

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Kontrola zkratových poměrů v průmyslovém
podniku**

Control of Short Circuit Conditions in Industrial
Company

2010

Petr Zavadil

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 5. května 2010

.....
Petr Zavadil

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. za odborné vedení při zpracování diplomové práce, za připomínky a vstřícnost.

Děkuji také panu Ing. Marku Tinkovi, Ph.D. za poskytnutí materiálů potřebných ke zpracování diplomové práce, za cenné rady a pomoc při odstraňování chyb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem a kontrolou zkratových poměrů v průmyslovém podniku.

Teoretická část obsahuje nejdůležitější poznatky o řešení zkratových poměrů, problematice napájení průmyslových podniků, a popisuje také základní provozní zapojení sítě zadaného průmyslového objektu. Blíže seznamuje s celkovým uspořádáním elektrizačních soustav, elektrických stanic, přenosových soustav a průmyslových rozvodů. Jsou zde uvedeny účinky zkratů na postižené části sítě, charakteristiky zkratových proudů a metody výpočtu zkratových poměrů podle normy ČSN EN 60909-0.

Praktická část se věnuje samotnému výpočtu maximálních a minimálních zkratových poměrů na všech rozvodnách vn a nn průmyslového podniku a kontrole kabelů vn na dovolené oteplení při zkratu.

Klíčová slova

Zkrat, zkratový proud, zkratový výkon, ekvivalentní oteplovací proud, impedance, průmyslové rozvody.

Abstract

This diploma thesis treats the issues of calculation of short circuit conditions in industrial company.

The theoretical parts deals with the most important knowledge about short circuits and the problem of power supply of industrial enterprises. It describes the basic operating system circuit of an industrial enterprise. It includes the detail description of general configuration of Electric Power Systems, Transmission Systems, power electrical distribution systems and electrical substation. There are mentioned the effects of short circuit for the afflicted parts of electrical power system, characteristics of short circuits and methods of calculation of short circuits conditions according to norm ČSN EN 60909-0.

The practical parts deals with the calculation of maximal and minimal short circuit conditions on all distribution points HV and LV of an industrial enterprise and includes the cable control vn allowed warming during the short circuit.

Keywords

Short circuit, short circuit current, short circuit capacity, equivalent warming current, impedance, industrial distributional points.

Seznam použitých symbolů a zkratk

α	- teplotní součinitel
θ_e	- teplota vodič na konci zkratu ($^{\circ}\text{C}$)
A	- počáteční hodnota stejnosměrné složky
ČSN	- česká státní norma
c	- napěťový činitel
EN	- evropská norma
I_k	- ustálený zkratový proud (kA)
$I_k^{''}$	- počáteční souměrný rázový zkratový proud (kA)
I_{LR}	- souměrný záběrový proud asynchronního motoru (A)
I_r	- jmenovitý proud elektrického zařízení (A)
I_{th}	- ekvivalentní oteplovací proud (kA)
i_{dc}	- stejnosměrná složka zkratového proudu
i_p	- nárazový zkratový proud
K	- korekční součinitel pro impedance
K	- koeficient pro výpočet oteplení při zkratu
l	- délka kabelu (km)
m	- činitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky
n	- činitel pro tepelné účinky střídavé složky
nn	- nízké napětí
P_{rT}	- jmenovité ztráty nakrátko transformátoru (MW)
R_K	- rezistance kabelu (Ω)
R_k	- rezistance kabelu na kilometr délky ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
R_L	- rezistance vedení (Ω)
R_{L20}	- rezistance při teplotě 20°C (Ω)
R_T	- rezistance transformátoru (Ω)
S	- průřez vodiče (mm^2)
$S_{k3}^{''}$	- zkratový výkon při trojfázovém zkratu (MVA)
S_{kn}	- jmenovitý zkratový výkon (MVA)
S_{rM}	- jmenovitý zdánlivý výkon motoru (MVA)
S_{rT}	- jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru (MVA)
T_k	- doba trvání zkratu (s)
$t_{k \max}$	- maximální doba odepnutí zkratu (s)
t_{\min}	- minimální doba vypnutí (s)
$U_{(1)}, U_{(2)}, U_{(0)}$	- napětí sousledné, zpětné, netočivé složkové soustavy

U_n	- jmenovité napětí sítě (kV)
U_r	- jmenovité sdružené napětí soustavy (kV)
U_{rM}	- jmenovité napětí motoru (kV)
U_{rT}	- jmenovité napětí transformátoru (kV)
u_{kR}	- impedanční napětí reaktoru (%)
u_{kr}	- jmenovité napětí nakrátko transformátoru (%)
u_{Rr}	- činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru (%)
v_n	- vysoké napětí
v_{vn}	- velmi vysoké napětí
X_K	- reaktance kabelu (Ω)
X_k	- reaktance kabelu na kilometr délky ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
X_M	- reaktance motoru (Ω)
X_S	- reaktance soustavy (Ω)
X_T	- reaktance transformátoru (Ω)
x_d''	- rázová reaktance alternátoru (%)
x_T	- poměrná reaktance transformátoru
$Z_{(0)}$	- nulová impedance zkratového obvodu (Ω)
$Z_{(1)}$	- sousledná impedance zkratového obvodu (Ω)
$Z_{(2)}$	- zpětná impedance zkratového obvodu (Ω)
Z_R	- impedance tlumivky omezující zkratový proud (reaktory) (Ω)
Z_T	- impedance transformátoru (Ω)

Obsah

1. Úvod	1
2. Problematika napájení průmyslových podniků	2
2.1. Elektrizace soustava	2
2.2. Elektrické stanice	3
2.2.1. Základní možná uspořádání rozvodných zařízení	3
2.3. Elektrické sítě	4
2.3.1. Síť paprskové radiální	4
2.3.2. Síť okružní	4
2.3.3. Mřížové sítě	5
2.4. Přenosová soustava	5
2.5. Transformátory	6
2.5.1. Blokové transformátory	6
2.5.2. Transformátory pro vlastní spotřebu	6
2.5.3. Síťové transformátory	7
2.6. Průmyslový rozvod elektrické energie	7
2.6.1. Vstupní a hlavní transformovna průmyslového podniku	7
2.6.2. Společné zásady pro všechny transformovny v průmyslovém rozvodu ..	7
2.6.3. Volba druhu transformátoru a rozváděčů	7
2.6.4. Hlavní rozváděče nn	8
2.6.5. Podružné rozváděče	8
2.6.6. Způsoby uložení kabelového vedení	8
2.6.7. Modernizace průmyslového rozvodu	8
2.6.8. Technologie projektu průmyslového podniku	9
2.6.9. Elektrické ochrany a jištění v průmyslovém podniku	9
3. Teoretický rozbor výpočtu zkratových poměrů	11
3.1. Základní pojmy	11
3.2. Charakteristiky zkratových proudů	13
3.3. Účinky zkratových proudů	14
3.4. Druhy zkratů	14
3.4.1. Souměrný zkrat	14
3.4.2. Nesouměrné zkraty	14
3.5. Metoda souměrných složek	15
3.6. Zkratové impedance elektrických zařízení	17
3.7. Předpoklady výpočtu zkratových proudů	17
3.7.1. Maximální zkratové proudy	17
3.7.2. Minimální zkratové proudy	17
3.7.3. Využití výpočtu maximálních a minimálních zkratových proudů	18
3.8. Metody výpočtu zkratových poměrů	18
3.8.1. Základní vztahy pro výpočet zkratových proudů a výkonu ve fyzikálních jednotkách	18
3.8.2. Určování sousledných parametrů prvků soustavy ve fyzikálních jednotkách	20
3.8.3. Jouleův integrál a ekvivalentní oteplovací zkratový proud	24

4. Popis provozního zapojení sítě průmyslového podniku	26
4.1. Varianta 1 – napájení z rozvodny R110 kV	26
4.2. Varianta 2 – napájení z rozvodny R22 kV	28
5. Výpočet maximálních zkratových poměrů na rozvodnách vn a nn	30
5.1. Příspěvky motorů na rozvodny vn.....	30
5.2. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.0 – varianta 1.....	35
5.3. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.2 – varianta 1.....	39
5.4. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.3 – varianta 1.....	40
5.5. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVS1-teplárna – var. 1.....	41
5.6. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR3 – varianta 1.....	42
5.7. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR2 – varianta 1.....	43
5.8. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR11 – varianta 1.....	44
5.9. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR16 – varianta 1.....	44
5.10. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR1 – varianta 1.....	45
5.11. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR5 – varianta 1.....	46
5.12. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR14 – varianta 1.....	46
5.13. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR17-HR – var. 1.....	47
5.14. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR17-R-T3 – var. 1.....	48
5.15. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR4 – varianta 1.....	48
5.16. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR9 – varianta 1.....	49
5.17. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR6 – varianta 1.....	50
5.18. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR8 – varianta 1.....	50
5.19. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR18 – varianta 1.....	51
5.20. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR7 – varianta 1.....	52
5.21. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR10 – varianta 1.....	52
5.22. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.1 – varianta 1.....	53
5.23. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.1 – varianta 2.....	54
5.24. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.0 – varianta 2.....	55
5.25. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.2 – varianta 2.....	56
5.26. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.3 – varianta 2.....	57
5.27. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVS1 – varianta 2.....	58
5.28. Maximální zkratové poměry na ostatních rozvodnách vn a nn – varianta 2... ..	59
6. Výpočet minimálních zkratových poměrů na rozvodnách vn a nn.....	60
7. Kontrola kabelů vn na dovolené oteplení při zkratu.....	63
8. Závěr	67
<i>Literatura.....</i>	<i>69</i>
<i>Seznam příloh</i>	<i>70</i>

1. Úvod

Mezi nejrozšířenější a zároveň nejzávažnější poruchy v elektrizační soustavě patří zkraty. Zkrat se projevuje zvýšením zatěžovacího proudu v rozvodných zařízeních na několikanásobné jmenovité hodnoty. Při zkratech dochází ke zvýšenému tepelnému namáhání i namáhání dynamickými silami. Tato namáhání jsou způsobena značnými hodnotami zkratových proudů, které mají nepříznivé účinky na vodiče elektrického silnoprůdového rozvodu, spotřebiče, rozvodná zařízení, a mohou také vést k ohrožení osob. K tomu, aby nedošlo k nepříznivým účinkům zkratů, se používají elektrické ochrany. Ty samočinně a ve velmi krátké době odpojí postiženou část elektrizační soustavy od zdroje elektrické energie. Přesto zkratové proudy jistou dobu působí na elektrická zařízení a rozvody, a ty se proto musí dimenzovat na maximální zkratové poměry, které mohou v elektrizační soustavě nastat.

Tato diplomová práce se proto věnuje výpočtu a kontrole zkratových poměrů, a to jednak z hlediska všeobecného teoretického rozboru, tak také z hlediska praktického výpočtu pro daný průmyslový podnik.

Diplomovou práci jsem rozdělil do několika částí, které postupně rozvíjejí problematiku napájení průmyslových rozvodů a účinky zkratů.

Úvodní kapitola se zabývá uspořádáním elektrizačních soustav, elektrických stanic, elektrických sítí a přenosových soustav. Velká část této kapitoly je věnována průmyslovým rozvodům elektrické energie. Přibližuje problematiku napájení průmyslových podniků, zásady pro vhodnou volbu transformátorů a rozváděčů, způsoby uložení kabelových vedení, a v neposlední řadě uvádí poruchy v průmyslových rozvodech a možnosti jejich jištění.

Následující kapitola seznamuje teoreticky s účinky zkratů. Vysvětluje základní pojmy, popisuje druhy zkratů, charakteristiky zkratových proudů. Důležitým aspektem této kapitoly je uvedení předpokladů výpočtu zkratových proudů pro maximální a minimální zkratové poměry, a samotné vztahy pro výpočet zkratových poměrů ve fyzikálních jednotkách.

V další části jsem popsal celkové provozní zapojení sítě daného průmyslového podniku pro obě zadané varianty, napájení všech rozvodů vn a nn.

Následující dvě kapitoly jsou již věnovány samotným praktickým výpočtům maximálních a minimálních zkratových poměrů u všech dvanácti rozvodů vn a devíti rozvodů nn, a to pro obě varianty napájení průmyslového podniku.

V závěrečné části jsem vypočetl maximální dovolenou dobu, do které musí být kabely vn vypnuty tak, aby nedošlo k překročení jeho dovoleného oteplení při zkratu.

V úplném závěru jsem zhodnotil všechny výsledky diplomové práce.

2. Problematika napájení průmyslových podniků

Elektrická energie je považována za nejušlechtlejší druh z používaných energií. Toto tvrzení je podloženo především výhodami, ke kterým patří výroba elektrické energie z různých primárních energetických zdrojů, možnost dopravy na velké vzdálenosti, jednoduchá zpětná transformace na různé jiné druhy energií, využívané jak k běžnému životu lidí, tak také v různých oblastech výroby. Jistě je zapotřebí uvést také některé nevýhody, ke kterým patří především nutnost okamžitého využívání vyrobené energie, znečišťování životního prostředí, dlouhodobá návratnost investičních nákladů. Přesto je elektrická energie nezastupitelnou v současném životě lidí. [5]

Elektroenergetická soustava musí v rámci investičních možností zajišťovat *tyto cíle*:

- a) pokrývání rostoucí spotřeby elektrické energie v dostatečném množství,
- b) zajišťování spolehlivosti a kvality dodávky elektrické energie,
- c) ochrana a tvorba životního a pracovního prostředí.

Současně ale působí tyto omezující vlivy:

- a) omezené primární zdroje energie,
- b) omezená surovinová základna.

Dostatečné množství elektrické energie se zajišťuje především budováním nových zdrojů a lepším využíváním zdrojů existujících.

Kromě nových zdrojů vyžaduje rostoucí spotřeba elektrické energie i odpovídající rozvoj přenosových a rozvodných soustav včetně elektrických stanic.

Snaha dovést elektrickou energii na místo spotřeby s nejmenšími ztrátami vede k tomu, že se elektrická energie přivádí do center spotřeby, do městských a průmyslových aglomerací nejvýše možným napětím. Teprve na místě se transformuje na napětí nižší a rozvádí se k jednotlivým skupinám spotřebičů. [6]

2.1. Elektrizace soustava

Elektrizace soustava je složena z části výrobní, tedy elektráren všeho druhu, dále z přenosové a rozvodné soustavy a ze spotřebičů elektrické energie. Elektroenergetika se zabývá především částí výroby elektrické energie, soustavou elektrických sítí a rozvodných energetických zařízení a užitím elektrické energie v distribuci a průmyslu. [5]

Rostoucí výkony zdrojů elektrické energie přináší celou řadu problémů, souvisejících s přenosy těchto výkonů, s růstem **zkratových proudů** a s mnoha dalšími otázkami. I když jsou to problémy společné pro sítě různých napětí, přece jen mají v různých napěťových hladinách různou důležitost. Zatímco se v soustavách vn a nn především zajímáme o jmenovité a zkratové proudy a v soustavách nn pak hlavně o dovolené odchylky napětí, v soustavách vvn a zvn převládají otázky stability přenosu elektrické energie, problémy izolační a otázky ochrany životního prostředí. [5]

Elektrizace soustava i každá její část musí nejvhodnějším způsobem plnit tyto požadavky:

- a) zajišťovat bezpečnost osob,

- b) zajišťovat dostatečnou, spolehlivou a kvalitní dodávku elektrické energie spotřebitelům,
- c) výrazně snižovat pracnost prací v provozu a v údržbě soustavy,
- d) pracovat s vysokou účinností,
- e) pracovat s vyššími parametry a s větším počtem zdrojů a elektrických stanic,
- f) využívat odpadního tepla,
- g) umožňovat řízení odběru elektrické energie,
- h) být materiálově nenáročná,
- i) zabraňovat nepříznivým vlivům soustavy na okolí (na životní prostředí).

Elektrizační soustavy jsou tvořeny jednotlivými zdroji, elektrickými stanicemi a sítěmi.[6]

2.2. Elektrické stanice

Elektrická stanice je ucelené zařízení uzlu elektrizační soustavy, sloužící buď k transformaci elektrické energie na jiné napětí a k jejímu rozvádění (transformovna), nebo k rozvádění elektřiny téhož napětí (spínací stanice), nebo k přeměně elektrického proudu střídavého na proud o jiném kmitočtu nebo stejnosměrný a k jeho rozvádění (měnič).

Vážné **ohrožení** elektrických stanic **představují zkratky**. Zkratové proudy dosahují značných hodnot a namáhají tepelně a dynamickými silami všechny části, jimiž procházejí. V místě zkratu vzniká obvykle elektrický oblouk, který svým zářením, horkými plyny a kovovými parami, ale také tlaky vyvolanými expanzí plynů a par ohrožuje obsluhu a zařízení.

Aby bylo možné čelit účinkům zkratových proudů, tj. aby zařízení elektrické stanice mohlo být dodatečně dimenzováno jak na tepelné, tak na dynamické účinky zkratových proudů, a aby je bylo možné bezpečně přerušit, tj. vypnout, je nutné znát jejich velikost. Ta je různá podle toho, v jaké síti (jak propojené a s jak velkými zdroji) zkrat nastal. [7]

Elektrické stanice jsou nedílnými součástmi elektrizačních soustav. Jsou jimi propojeny sítě různých proudových a napěťových soustav a přes ně se také jednotlivé sítě navzájem ovlivňují. Musí být proto řešeny tak, aby umožňovaly všechny transfigurace soustavy, umožněné propojovanými sítěmi. Jejich umístění v soustavě musí být voleno optimálně. Distribuční elektrické stanice by měly ležet pokud možno v centrech spotřeby.

Důležitost elektrické stanice je jedním z hledisek při stanovování požadovaného stupně spolehlivosti stanice. Čím spolehlivější je elektrická stanice, tím je dražší. Optimální řešení spolehlivosti dodávky elektrické energie bude tedy takové, při němž se bere v úvahu vzájemné zálohování jednodušších stanic v rámci účelně volených konfigurací sítí. [6]

Základní části elektrických stanic jsou **rozvodná zařízení**.

2.2.1. Základní možná uspořádání rozvodných zařízení

- a) rozvodná zařízení vvn (nad 52 kV),
- b) rozvodná zařízení vn (do 52 kV),
- c) rozvodná zařízení nn.

V principu je elektrické rozvodné zařízení v provedení buď venkovním nebo vnitřním. Z ekonomického hlediska je výhodnější venkovní provedení, neboť odpadá převážná část nákladů stavebních (což bývá u krytých rozvodů až 60% ceny rozvodného zařízení).

Tam, kde je nebezpečí znečištění ovzduší (a tím i izolace elektrického zařízení) prachem, popílkem, párami, plyny apod. a v blízkosti chladících věží použije se provedení vnitřní.

U venkovního provedení je větší nárok na plochu zastavění (provedení v jedné výškové hladině), což je nevýhodou. Z výše uvedených důvodů se u nás rozvodny vvn provádějí jako venkovní, s výjimkou míst s velkým znečištěním, kde se užívá halové provedení. V poslední době se prosazuje využití zapouzdřených rozvodů tam, kde je nedostatek místa (průmyslové rozvody, centrální části velkých měst).

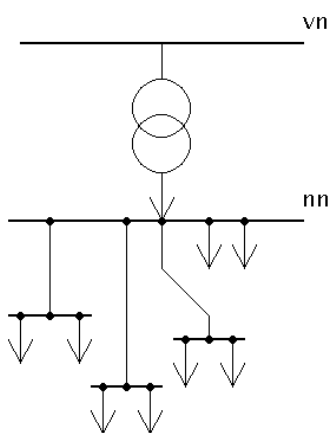
Rozvodná zařízení vn průmyslová se provádějí zásadně jako vnitřní, distribuční rozvodná zařízení jsou většinou ve vnitřním provedení. [7]

2.3. Elektrické sítě

Elektrickými sítěmi se rozumějí souhrny všech galvanicky spojených částí téhož napětí. V rámci elektrizační soustavy můžeme mluvit o sítích 110 kV, o sítích 22 kV apod. Sítě jednotlivých napěťových a proudových soustav jsou od sebe odděleny **transformovny** nebo **měnírnami**. Podle hladin napětí rozdělujeme elektrické sítě na nn, vn a vvn. [6]

2.3.1. Sítě paprskové radiální

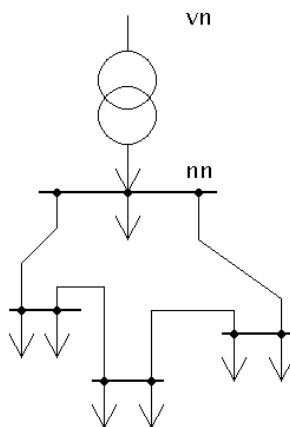
Vedení vychází z transformovny a zásobuje jednotlivé odběry. Každý paprsek je samostatný a nelze je vzájemně spojovat. Paprskový způsob zásobování je sice nejlacinější, ale jistota dodávky je nejmenší. Příklad paprskové sítě je na obr. 1. [5]



obr. 1 Paprsková radiální síť

2.3.2. Sítě okružní

Jednotlivé polosmyčky jsou vedeny tak, aby se daly ve spínacích trafostanicích sepnout. Obvykle se provozují rozepnuté, tedy jako paprskové. Sítě okružní (viz. obr. 2) jsou dražší než paprskové, pro větší délku nezbytných vedení, avšak jsou provozně jistější. Provoz rozepnutých okružních sítí je přehledný a nenáročný. Používá se v praxi pro všechny hladiny napětí nn, vn a vvn.

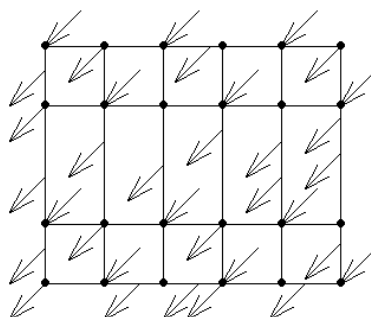


obr. 2 Okružní síť

2.3.3. Mřížové sítě

Mřížová síť (viz obr. 3) se používá převážně u nn kabelových sítí, v některých případech i u vn sítí.

Zjednodušená mřížová síť je vlastně sepnutá okružní síť. Tyto sítě jsou sestaveny a jištěny tak, aby se vadný úsek selektivně odpojil pojistkami. Ostatní síť musí zůstat v provozu. [5]



obr. 3 Mřížová síť

2.4. Přenosová soustava

Přenosové soustavy slouží k přenosu velkých výkonů mezi hlavními uzly elektrizační soustavy. [6]

Elektrická energie se u nás přenáší soustavami 3 ~ 50 Hz 400 kV a 3 ~ 50 Hz 220 kV, obě s účinně uzemněným uzlem. Části s napětím 220 kV se nebudou dále rozvíjet. Vyšší napětí se u nás dosud nepoužilo. V zahraničí jsou provozovány přenosové soustavy s napětím 220 kV, 330 kV, 500 kV, 750 kV a 1150 kV. [5]

Zdroje (elektrárny) jsou buď přímo zapojeny do soustav 400 kV nebo 220 kV, popř. jsou zapojeny do sítí 110 kV, které pracují do přenosových soustav přes zvyšovací transformátory. Uzly přenosové soustavy jsou tvořeny elektrickými stanicemi, jejichž funkcí je spínat různé

větvě soustavy a obvykle v téže stanici transformovat elektrickou energii na jiné napětí, většinou na distribuční napětí 110 kV v transformovnách 400/110 kV, popř. 220/110 kV. Z těchto stanic jsou pak napájeny veřejné rozvodné soustavy. [6]

Přenosové soustavy jsou tvořeny venkovními vedeními, která se při přenosu výrazně projevují svými konstantami (odpor, indukčnost, kapacita, svod), a způsobují tím řadu problémů. Optimální výkon přenášený vedením je tzv. **přirozený výkon**, při kterém se vyrovnávají indukční a kapacitní ztráty, takže vedení se samo kompenzuje.

Vlastnosti přenosu lze ovlivnit změnou indukčnosti nebo kapacity vedení kondenzátorovými bateriemi, synchronními kompenzátory nebo tlumivkami. [6]

2.5. Transformátory

Transformátor je nezastupitelným strojem ve střídavém rozvodu energie. Umožňuje zvyšovat a snižovat napětí pro dálkové přenosy a místní rozvod střídavé energie.

Hlavní transformátory jsou buď čistě blokové přímo spojené s alternátorem, nebo spojovací, sloužící pro spojení soustav dvou napětí. Blokové uspořádání se používá ve velkých tepelných kondenzačních elektrárnách, jaderných elektrárnách a některých vodních elektrárnách, které předávají celý svůj výkon do elektrizační soustavy. Spojovacích transformátorů se používá v elektrárnách s odběrem na generátorovém napětí jako jsou teplárny, závodní elektrárny a některé vodní elektrárny.

2.5.1. Blokové transformátory

Výkon blokových transformátorů je dán výkonem alternátoru. Tam, kde je vlastní spotřeba bloku napájena odbočkou ze svorek alternátoru, se doporučuje výkon transformátoru volit $(93\div 95)\%$ výkonu alternátoru.

Počet blokových transformátorů je zpravidla shodný s počtem alternátorů. Zásadně se používají trojfázové transformátory. Tři jednofázových transformátorů lze použít pro bloky velkých výkonů (několika set MVA).

Spojení vinutí blokových transformátorů je Y_d , přičemž trojúhelník je zásadně na straně alternátoru. Vyloučí se tím jednak třetí harmonická napětí na výstupu transformátoru (sinusovost napětí), jednak se zlepší rozdělení zatížení na jednotlivé fáze alternátoru, zejména při nesouměrných zkratech nebo nesouměrném zatížení v síti (trojúhelník tvoří pro netočivou složkovou soustavu zkrat). V neposlední řadě je vinutí do trojúhelníka výhodné i proto, že fáze je na plné sdružené napětí, čímž při daném výkonu vycházejí nižší proudy, což dává možnost použít slabší průřez vodiče.

2.5.2. Transformátory pro vlastní spotřebu

Správný chod technologických částí každé elektrárny zajišťují pomocná zařízení, která mají nejčastěji elektrický pohon. Všechna tato zařízení tvoří tzv. vlastní spotřebu.

Výkon pracovních zdrojů vlastní spotřeby se určuje v zásadě z příkonu všech spotřebičů, které musí být v chodu při maximálním výkonu hlavního bloku.

2.5.3. Sít'ové transformátory

Velké sít'ové transformátory se vyrábějí s chlazením jádra i vinutí olejem. Drobné sít'ové transformátory s převodem 6 kV/nn jsou vzduchové, a to pro výkony 800 kVA až 1600 kVA, 2,5 MVA až 30 MVA.

Výkony sít'ových traf mohou být větší než u transformátorů blokových, avšak rozdíly napětí mezi vstupním a výstupním napětím bývají menší.

Uzlové body těchto transformátorů se vyvádějí tak, aby se v síti vvn mohly uzemnit, kdežto v síti vn se musí vyvést se zesílenou izolací pro připojení kompenzačního zařízení. [5]

2.6. Průmyslový rozvod elektrické energie

2.6.1. Vstupní a hlavní transformovna průmyslového podniku

- Malé průmyslové závody a podnikatelé napájení transformátory 2 x 1 MVA, mají pouze jednu transformovnu 22 kV / nn.
- Středně velké průmyslové závody s příkonem $2 \div 10$ MVA mají obvykle hlavní a vstupní transformovnu sloučenou 22 / 6 kV, 6 kV / nn.
- Velké průmyslové závody s příkonem nad 10 MVA mají vstupní transformovnu umístěnou v nejvhodnějším místě pro připojení. Kromě této vstupní transformovny je ještě v závodě několik hlavních rozvodů, umístěných v provozovnách s největším odběrem elektrické energie. Podružné transformovny jsou umístěny co nejbližší spotřebičům. [5]

V závodech s velkou plošnou rozlohou, kde provozy jsou od sebe ve velkých vzdálenostech, umísťujeme rozvodny do podružných transformoven. Podružné transformovny jsou připojeny na okružní napájecí kabelový rozvod vn. Z podružných rozvodů může být napájen buď paprskový rozvod nebo mřížová průmyslová síť.

2.6.2. Společné zásady pro všechny transformovny v průmyslovém rozvodu

Transformovny budujeme **co nejbližší** k největší spotřebě elektriny. **Napětí vn** přivádíme až **do nejbližší vzdálenosti k elektrickým spotřebičům**.

Jsou-li přívody provedeny venkovním vedením, musíme dbát předpisové vzdálenosti od budov i pro výstavbu v budoucnu.

Transformátorové komory se stavějí na severní straně z důvodu řádné klimatizace prostoru.

Příjezdové cesty k transformovnám mají být co nejméně nákladné.

U malých závodů bývá většinou pouze jedna transformovna vn / nn. Pak je výhodné ji umístit do středu největší spotřeby. Budování jediné trafostanice je omezeno přenosovou schopností kabelových rozvodů nn. Za limitní hodnotu se považuje přenos 70 000 kW.m. Tj. 700 kW na vzdálenost 100 m nebo 350 kW na 200 m apod.

2.6.3. Volba druhu transformátoru a rozváděčů

Olejoyé transformátory při převodech 35, 22 kV / nn musejí být umístěny mimo provoz závodu v oddělených trafokobkách.

Suché nebo bezolejové transformátory (Clophen, Sovtol) lze umístit přímo v provozovnách, ve vyšších poschodích nebo na střechách budov. Jedná se o transformaci 6 kV / nn. Tím splníme ekonomickou zásadu přivést energii co nejbližší ke spotřebičům.

2.6.4. Hlavní rozváděče nn

Každý transformátor má svůj hlavní rozváděč nn, který napájí příslušný úsek přípojníc. Nejrozšířenější jsou rozváděče panelové a skříňové.

Je-li nutné, aby příslušný úsek přípojníc napájel větší transformátor nebo teplárenský turbogenerátor, pak je nutné použít rozváděč kobkový. Hlavní rozváděč nn umísťujeme v transformovnách. Návrh hlavních rozváděčů řešíme s minimální odlišností výzbroje jednotlivých odboček, které mají být výkonově přibližně stejné.

2.6.5. Podružné rozváděče

Jsou napájeny z hlavních rozváděčů a umístěny přímo v provozovnách, kde napájí jednotlivé větší stroje nebo motorové větve se skupinou strojů.

V poschodových budovách bývají rozváděče etážové, které jsou umístěny u vchodu do poschodí. Zásadně musí mít každý etážový a podružný rozváděč hlavní vypínač výkonový, který umožní vypnutí výroby z provozu.

2.6.6. Způsoby uložení kabelového vedení

Kabelové vedení se ukládají do výkopů, kanálů a na kabelové mosty.

Křižování kabelů

Při křižování elektrických kabelů nn a vn se kabely **nn ukládají vždy nad kabely vn**.

Při souběhu nebo křižování elektrických kabelů se slaboproudými kabely platí minimální vzdálenost v průmětu křížení 30cm.

Kabely je nutno chránit před mechanickým poškozením uložením do tvárnic nebo trub.

Souběh elektrického kabelu s tepelným potrubím není dovolen, pokud nejde o průchozí energetický kanál.

Energetický kanál se běžně používá u velkých průmyslových závodů. Podle provedení označujeme energokanály jako: A...shora přístupné, B...průchozí, umožňující průchod vzpřímené osobě, C...průlezný.

Kabelové kanály vyúsťují obvykle do prostorů pod rozvodnami vn, nn a dozornami.

Postup při návrhu kabelových kanálů a jejich výzbroje:

- Určení typu kabelového kanálu podle počtu kabelů, určení výšky a šířky.
- Podle průměru kabelu se určí rozteč ložení na roštu.
- Stanovení potřebného množství materiálu na 1 m délky kabelového kanálu podle výzbroje.

2.6.7. Modernizace průmyslového rozvodu

Zásady modernizace:

- Nahrazujeme zastaralá a málo bezpečná zařízení.
 - Rozšiřujeme zařízení elektrického rozvodného systému na základě nových požadavků.
-

Nový projekt vypracováváme zásadně tak, jako by šlo v obou případech o novou stavbu. Ohledy na staré zařízení působí často nepříznivě na nově navrhovanou koncepci. Nejvyšších úspor hospodárnosti rozvodu dosáhneme zvýšením rozvodného napětí (snížení ztrát) a umístěním transformátoru do místa největšího odběru.

Hlavní požadavky kladené na moderní zařízení rozvodu vn:

- zvýšení provozní spolehlivosti,
- prodloužení doby bezrevizního chodu,
- automatizované nebo programové zařízení,
- účelná miniaturizace rozměrů.

2.6.8. Technologie projektu průmyslového podniku

V průmyslovém podniku můžeme rozdělit el. zařízení takto:

- Transformovna vvn / vn, vn / vn
- Hlavní rozvodna vn
- Podružné spínací stanice vn
- Transformovna vn / nn
- Průmyslová měnírna (zvláštní zdroje energie)
- Napájecí rozvod vn a nn
- Provozní rozvod vn a nn
- Rozvod pro měření, kontrolu, signalizace a ovládání
- Dozorna, velín
- Výroba a rozvod stlačeného vzduchu
- Akumulátorovna

Rozsah jednotlivých uvedených souborů bývá uveden v technické zprávě projektu, která zdůvodňuje navržené elektrotechnické řešení (volbu napětí, balance odběru a dodávky, zkratové poměry, volbu ochrany a jištění atd.).

2.6.9. Elektrické ochrany a jištění v průmyslovém podniku

V provozu silnoprůdného elektrického rozvodu se mohou vyskytnout i takové stavy, které narušují bezpečnost provozu. Přitom může dojít k elektrickému, tepelnému i mechanickému ohrožení bezpečnosti osob, obsluhujících tato zařízení.

Takové stavy jsou nežádoucí a nazýváme je **poruchami**.

V provozu elektrických zařízení mohou nastat následující poruchy:

- **Přepětí** mohou být atmosférická, způsobená přímým úderem blesky do vedení či do nekrytých částí elektrických zařízení, nebo způsobená indukcí při úderu blesku v blízkosti vodičů nebo jiných částí rozvodných zařízení. Dále mohou být přepětí provozní, způsobena spínacími pochody v obvodech s velkými indukčnostmi nebo kapacitami. Přepětí mohou mít za následek proražení izolace či nežádoucí přeskoky mezi živými částmi elektrických zařízení.
- **Přetěžování**, neboli zatěžování vodičů či elektrických spotřebičů a zařízení proudem větším než je hodnota jmenovitého proudu. Přetěžování může být krátkodobé či dlouhodobé. Krátkodobé nebo přechodné přetěžování nemusí být nebezpečné,

pokud při něm teplota vodičů či jiných částí silnoprůdého rozvodu nedosáhne nejvyšší dovolené provozní teploty, odpovídající trvalému zatěžování jmenovitým proudem. Dlouhodobé přetěžování je nebezpečné téměř vždy, a proto je nežádoucí.

- **Zkratky a zemní spojení** mohou nastat v jedné, dvou či všech třech fázích a projevují se zvýšením zatěžovacího proudu v rozvodných zařízeních na několikanásobek jmenovité hodnoty. Současně dojde k poklesu napětí v takové míře, která je nepřímo úměrná elektrické vzdálenosti od místa zkratu. Při zkratech dochází ke zvýšenému tepelnému namáhání i namáhání dynamickými silami. Tato namáhání jsou způsobena značnými hodnotami zkratových proudů a mohou mít nepříznivé následky, jak pro vodiče elektrického silnoprůdého rozvodu, tak i pro spotřebiče a ostatní rozvodná zařízení.
- **Znečištění izolace vodičů a rozvodného zařízení**, které se může projevit v takové míře, že zmenší hodnotu elektrické pevnosti na povrchu izolace. Zejména při větší vlhkosti prostředí se vytváří na povrchu znečištěných izolátorů, svorek a dalších silnoprůdých zařízení částečně vodivá vrstva, která může vést až k přeskokům po povrchu izolace. Po jediném či opakovaném přeskoku se může místo přeskoku stát i trvale vodivým spojením, které se odstraní až dokonalým vyčištěním izolace. Následky této poruchy jsou pak obdobné jako u zkratů či zemních spojení. Projevuje se zhoršené chlazení.
- **Náhodné poruchy** (např. námraza, pád větví, stromů, apod.) – mohou vzniknout buď selháním technického zařízení, nebo vlivem neočekávaných klimatických změn, eventuálně chybným zásahem člověka či zásahem zvířat u zařízení venkovního provedení.

Všechny uvedené druhy poruch se vyskytují v elektrickém silnoprůdém rozvodu nepravidelně, nahodile a nelze je zcela vyloučit, i když účinnými preventivními opatřeními lze jejich četnost snížit. Dojde-li ovšem k poruše v rozvodném zařízení, pak je potřeba co nejrychleji odpojit tuto část elektrického rozvodu od všech zdrojů elektrické energie, aby následky poruchy byly co nejmenší. K tomu slouží v elektrickém silnoprůdém rozvodu **elektrické ochrany**, které samočinně a ve velmi krátké době odpojí porušené místo, vodič, elektrický obvod či spotřebič od zdroje elektrické energie. Elektrické ochrany v silnoprůdém rozvodu nn do 500 V se nejčastěji nazývají **jističí přístroje**. Jsou to uměle vytvořená nejslabší místa v silnoprůdém rozvodu, která jsou dimenzovaná tak, aby se při přetěžování porušila dříve než všechna ostatní zařízení rozvodu a aby zároveň odpojila všechna zařízení, pro která by nadměrné zatěžování mohlo znamenat poškození či ohrožení jejich funkce. Ne vždy dochází k odpojení zařízení.

3. Teoretický rozbor výpočtu zkratových poměrů

Nejrozšířenějšími poruchami v elektrizační soustavě jsou zkraty. Zkrat vznikne poruchovým spojením dvou nebo tří fází navzájem, a v soustavách s uzemněnou nulou také spojením do krátka jedné nebo dvou fází se zemí. Tím dochází ke vzniku nežádoucích zkratových proudů.

Hlavními příčinami vzniku zkratu bývají poruchy izolace, způsobené přepětím, přímým úderem blesku, zestárnutím izolačních materiálů; zapnutí a vypnutí článku soustavy, vznik místní nesymetrie, regulace elektrických strojů a přímé poškození venkovních vedení a kabelů.

Při zkratu se celková impedance zkratem postižené části sítě zmenšuje, zvětšují se proudy ve větvích. To vede ke snížení napětí v uzlech, zvláště pak v místech blízkých zkratu. Obvykle v místě zkratu vznikají přechodné odpory vzniklého oblouku a ostatních částí cesty poruchového proudu. Přesné určení velikosti těchto odporů, zvláště odporu oblouku, je velice obtížné. Proud i délka oblouku se v průběhu zkratu mění, z čehož vyplývá, že se mění i odpor oblouku. Při výpočtu zkratových proudů pro účely dimenzování elektrických zařízení přechodné odpory zanedbáváme. [2]

3.1. Základní pojmy

Zkrat – náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.

Mezifázový zkrat – náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodiči se spojením na zem nebo bez něj.

Zkrat mezi fází a zemí (jednofázový zkrat) – náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi vodičem a zemí v soustavě s uzlem uzemněným přímo nebo přes malou impedanci.

Zkratový proud – nadproud v důsledku zkratu v elektrické soustavě.

Předpokládaný zkratový proud – proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

Souměrný zkratový proud – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbanou eventuální aperiodickou složkou proudu. [3]

Počáteční rázový zkratový proud I_k – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci (viz. obr. 4 a obr. 5).

Stejnoseměrná (aperiodická) složka zkratového proudu i_{DC} – stěrní hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule, podle obr. 4 a obr. 5.

Jmenovité napětí sítě U_n – sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

Nárazový zkratový proud i_p – maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu (viz. obr. 4 a obr. 5).

Ustálený zkratový proud I_k – efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu (viz. obr. 4 a obr. 5).

Napětí ekvivalentního zdroje $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ - napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu. Jedná se o jediné aktivní napětí sítě.

Napět'ový součinitel c – poměr mezi napětím ekvivalentního napět'ového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$; hodnoty jsou uvedeny v tabulka 1.

Pozn.: Uvedený napět'ový součinitel c je nutný z následujících důvodů:

- kolísání napětí v závislosti na čase a místě,
- přepínání odboček transformátoru,
- zanedbání zátěže a kapacitních reaktancí při výpočtu,
- chování generátorů a motorů při přechodném ději.

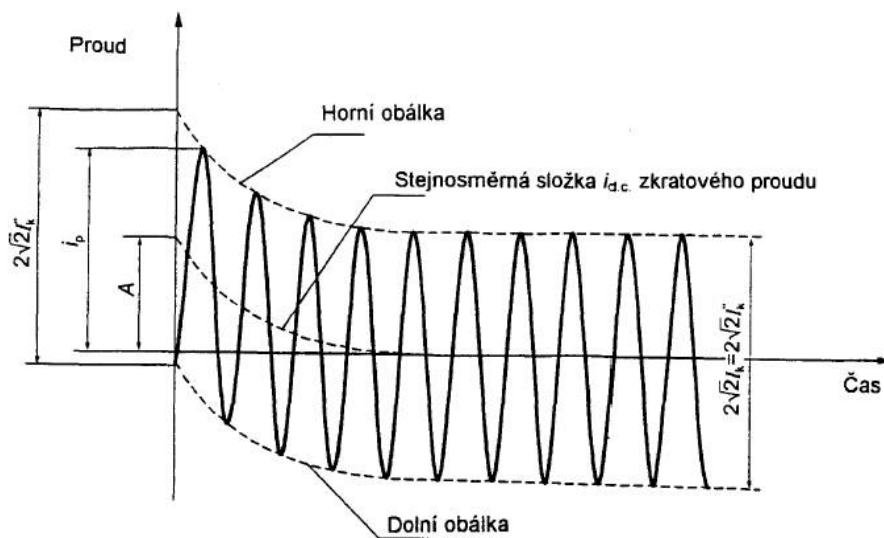
Elektricky vzdálený zkrat – zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní (viz. obr. 4).

Elektricky blízký zkrat – zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních a synchronních motorů překračuje 5 % počátečního rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů (viz. obr. 5). [3]

Minimální doba vypnutí t_{min} – nejkratší čas mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} – efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

3.2. Charakteristiky zkratových proudů



obr. 4 Zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou

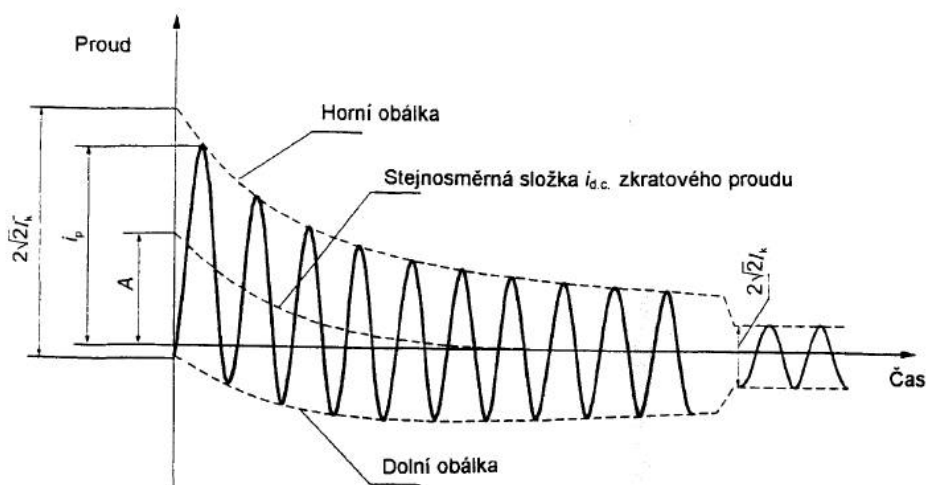
kde I_k je počáteční souměrný rázový zkratový proud,

i_p nárazový zkratový proud,

I_k ustálený zkratový proud,

i_{DC} stejnosměrná složka zkratového proudu,

A počáteční hodnota stejnosměrné složky i_{DC} .



obr. 5 Zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou

kde I_k je počáteční souměrný rázový zkratový proud,

i_p nárazový zkratový proud,

I_k ustálený zkratový proud,

i_{DC} stejnosměrná složka zkratového proudu,

A počáteční hodnota stejnosměrné složky i_{DC} .

3.3. Účinky zkratových proudů

Působením velkých proudů se zkraty v elektrizačních zařízeních projevují mnohými nepříznivými účinky, které ohrožují nejen bezpečnost provozu soustavy a bezpečnost zařízení, ale vážně ohrožují i bezpečnost obsluhy elektrických zařízení. Jsou vyvolány buď přímo zkratovým proudem (jsou to jeho silové, tepelné a indukční účinky), nebo poklesem napětí ve zkratovém obvodu (vliv na spotřebiče a na stabilitu rozvodné soustavy) a elektrickým obloukem, pokud jde o zkrat obloukový.

Hluboké poklesy napětí vznikající při zkratech mohou působit rušivě na chod mnoha elektrických spotřebičů. Navíc mohou být příčinou narušení stability paralelního chodu alternátorů, což je vlastně jeden z nejnebezpečnějších následků zkratů, neboť postihuje provoz celé elektrizační soustavy.

Při zemních zkratech mohou vzniknout nebezpečné vlivy působící na paralelní komunikaci vedení i na zařízení uložená v zemi.

Zemní spojení je nebezpečné pro izolaci fází a nulových uzlů článků elektrizační soustavy, neboť při něm fázová napětí dosahují velikosti sdružených napětí a napětí nulového uzlu transformátorů vzrůstá na velikost fázového napětí. Při přerušovaném zemním spojení se napětíové namáhání izolace ještě několikanásobně zvětšuje. [1]

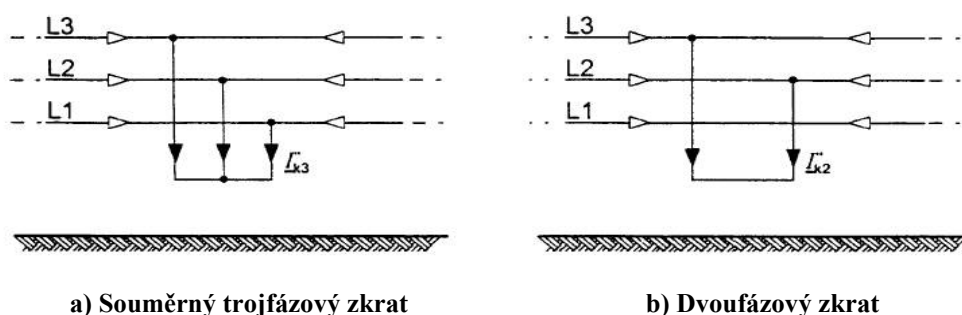
3.4. Druhy zkratů

3.4.1. Souměrný zkrat

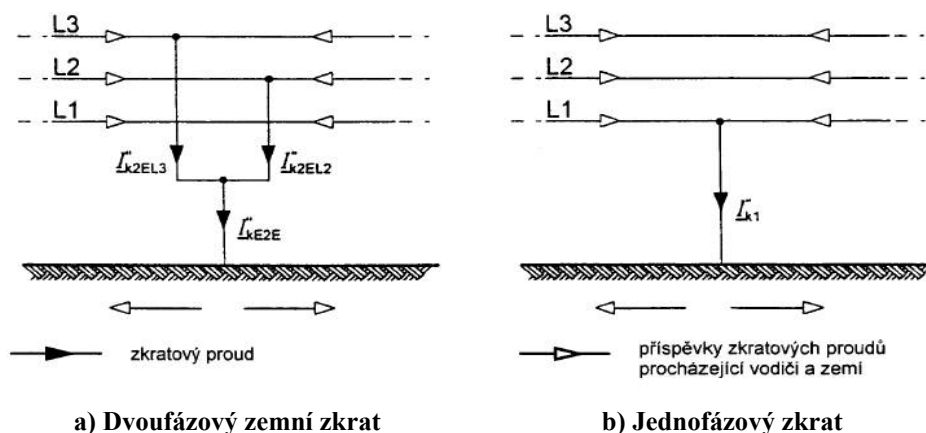
Souměrný trojfázový zkrat (viz obr. 6a) může nastat při kovovém dotyku všech tří fází navzájem. Všechny tři vodiče jsou shodně postiženy a vedou stejný zkratový proud. Tento druh zkratu se nejčastěji vyskytuje v kabelových sítích (oblouk, vzniklý při jakémkoliv zkratu snadno poruší izolaci mezi všemi fázemi) a vede často k nejvyšším hodnotám předpokládaného zkratového proudu.

3.4.2. Nesouměrné zkraty

- **Dvoufázový zkrat izolovaný** (viz obr. 6b) vzniká v prostém spojení dvou různých fází.
- **Dvoufázový zkrat zemní** (viz obr. 7a) vzniká při spojení dvou různých fází a země.
- **Jednofázový zkrat** (viz obr. 7b) vzniká při spojení jedné fáze se zemí a soustavy s uzemněným uzlem. Způsobuje největší rušení sdělovacích vedení.



obr. 6 Charakteristiky zkratů a jejich proudů



obr. 7 Charakteristiky zkratů a jejich proudů

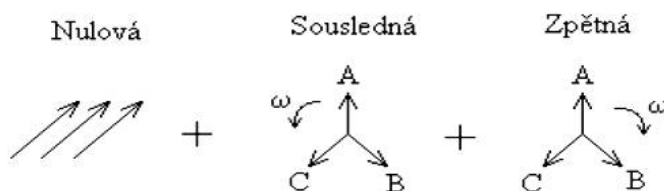
Pozn.: Směr šipek označujících proud je zvolen.

Souměrný trojfázový zkrat působí na trojfázovou soustavu symetricky. Všechny ostatní zkraty způsobují asymetrické zatížení.

Výpočet hodnot proudů při nesouměrných zkratech se zjednodušuje použitím **metody souměrných složek**.

3.5. Metoda souměrných složek

Ve trojfázových soustavách lze každou hvězdicí nesymetrických fázorů nahradit složením symetrických fázorů soustavy sousledné (index 1), zpětné (2) a netočivé neboli nulové (0). [4]



obr. 8 Fázory sousledné, zpětné a netočivé složky

Pokud je zvolena fáze A jako referenční, platí:

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_1 + U_2 + U_0 \\
 U_B &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0 \\
 U_C &= a U_1 + a^2 U_2 + U_0
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Základní vektor:

$$\begin{aligned}\underline{a} &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \underline{a}^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\end{aligned}\tag{3.2}$$

$$\underline{U}_A = U_f \quad U_B = U_f \cdot \underline{a}^2 \quad \underline{U}_C = U_f \cdot \underline{a}\tag{3.3}$$

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \quad 1 - \underline{a} - \underline{a}^2 = 2 \quad \underline{a} - \underline{a}^2 = j\sqrt{3}\tag{3.4}$$

Po označení:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} \quad \mathbf{U}_F = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{pmatrix}\tag{3.5}$$

Je možno soustavu přepsat do maticového tvaru:

$$\mathbf{U} = \mathbf{F}\mathbf{U}_F\tag{3.6}$$

kde pro matici \mathbf{F} platí:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{pmatrix}\tag{3.7}$$

Protože determinant matice \mathbf{F} je různý od nuly, je možno provést její inverzi a přejít od fázových hodnot k hodnotám stejnosměrných složek:

$$\mathbf{U}_F = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{U}\tag{3.8}$$

kde pro inverzní matici \mathbf{F}^{-1} platí:

$$\mathbf{F}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}\tag{3.9}$$

Z toho pak:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) \\ \underline{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{a} \cdot \underline{U}_B + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_C) \\ \underline{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_B + \underline{a} \cdot \underline{U}_C)\end{aligned}\tag{3.10}$$

3.6. Zkratové impedance elektrických zařízení

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobného zařízení jsou si sousledná a zpětná zkratová impedance soustavy rovny: $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (například zemí, zemnicím zařízením, nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm a kabelovým pancířem). V tomto případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky. [3]

3.7. Předpoklady výpočtu zkratových proudů

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým zkratem a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Odpor oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Výpočty zajišťují dostatečnou přesnost výsledků, i když tyto předpoklady pro uvažované elektrické soustavy neodpovídají zcela přesně dané skutečnosti.

Pro souměrné a nesouměrné zkraty je vhodné počítat zkratové proudy pomocí metody souměrných složek. [3]

Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou, obvykle na tu napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud.

3.7.1. Maximální zkratové proudy

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\max} (viz tabulka 1), [3]
- zapojení soustavy (provozně přípustné) takové, které v místě zkratu dává největší zkratové proudy,
- chod uvažovaných zdrojů je s jmenovitým výkonem, napětím a účínkem,
- chod motorů. [8]

3.7.2. Minimální zkratové proudy

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\min} (viz tabulka 1),

- vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu,
- motory musí být zanedbány,
- rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě:

$$R_L = [1 + \alpha (\theta_e - 20^\circ \text{C})] \cdot R_{L20} \quad (3.11)$$

kde R_{L20} je rezistance při teplotě 20°C ,

θ_e teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu,

α součinitel rovný $0,004/\text{K}$, platný s dostatečnou přesností pro praktické účely pro měď, hliník a slitinu hliníku. [3]

3.7.3. Využití výpočtu maximálních a minimálních zkratových proudů

Maximální zkratový proud se vypočítává proto, aby jeho účinky nevedly k havárii zařízení. Proto je třeba zařízení ve zkratovém obvodu dimenzovat tak, aby účinkům maximálního zkratového proudu, zejména účinkům silovým a tepelným, bezpečně odolala.

Minimální zkratové proudy se určuje z důvodu správného nastavení ochran. Ochrana musí při minimální hodnotě zkratového proudu bezpečně včas zapůsobit.

3.8. Metody výpočtu zkratových poměrů

Postup při výpočtu zkratových poměrů:

- sestavení náhradního schématu soustavy (náhradní schéma sousledné složky pro souměrné zkraty, pro nesouměrné zkraty náhradní schéma všech složek),
- stanovení ohmické hodnoty (poměrné) impedance všech prvků náhradních schémat,
- určení výsledné impedance náhradních schémat zkratového obvodu,
- výpočet zkratových poměrů.

Při výpočtu zkratových poměrů používáme vztahy ve fyzikálních jednotkách.

3.8.1. Základní vztahy pro výpočet zkratových proudů a výkonu ve fyzikálních jednotkách

Počáteční rázový zkratový proud I''_k při trojfázovém zkratu

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (\text{kA}; -; \text{kV}; \Omega) \quad (3.12)$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k2} při dvoufázovém zkratu

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3} \quad (\text{kA}; -; \text{kV}; \Omega) \quad (3.13)$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k1} při jednofázovém zkratu

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad (\text{kA}; -; \text{kV}; \Omega) \quad (3.14)$$

kde c je napětový činitel (viz),

- U_n jmenovité sdružené napětí sítě v místě zkratu,
- $Z_{(1)}$ výsledná sousledná impedance zkratového obvodu,
- $Z_{(2)}$ výsledná zpětná impedance zkratového obvodu,
- $Z_{(0)}$ výsledná nulová impedance zkratového obvodu. [3]

Zkratový výkon při trojfázovém zkratu

$$S''_{k3} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3} \quad (\text{MVA}; -; \text{kV}; \text{kA}) \quad (3.15)$$

kde U_n je jmenovité sdružené napětí v místě zkratu,

I''_{k3} počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu.

tabulka 1 Napětový součinitel c

Jmenovité napětí U_n	Napětový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů $C_{\max}^{1)}$	minimálních zkratových proudů C_{\min}
Nízké napětí 100 V až 1000 V	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV		

Pozn.: ¹⁾ $c_{\max} \cdot U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno, potom $c_{\max} \cdot U_n = U_m$ nebo $c_{\min} \cdot U_n = 0,90 \times U_m$.

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V.

⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10 %.

3.8.2. Určování sousledných parametrů prvků soustavy ve fyzikálních jednotkách

Síťové napáječe

Je-li trojfázový zkrat napájen ze sítě, u které je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kQ} v bodě připojení napáječe Q, pak ekvivalentní impedance Z_Q (sousledná zkratová impedance) sítě v bodě připojení napáječe se určuje následovně:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}} \quad (\Omega; -; \text{kV}; \text{kA}; \text{MVA}) \quad (3.16)$$

kde U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q,

c napěťový činitel (viz tabulka 1),

S_{kQ} zkratový výkon soustavy při trojfázovém zkratu v bodě připojení napáječe Q,

I''_{kQ} počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q.

Pro soustavu oddělenou od místa zkratu transformátorem a při zbežném výpočtu lze uvažovat $Z = X$.

Synchronní generátory

Při výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátorů bez blokových transformátorů je třeba použít v sousledné složkové soustavě následující impedanci:

$$Z_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jx''_d) \quad (\Omega) \quad (3.17)$$

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_G \quad (\Omega) \quad (3.18)$$

$$X_G = \frac{x''_d \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad (\Omega; \% ; \text{kV}; \text{MVA}) \quad (3.19)$$

kde x''_d je rázová reaktance alternátoru,

U_{nG} jmenovité napětí alternátoru,

S_{nG} jmenovitý výkon alternátoru.

S vlivem různých teplot vinutí se rezistance neuvažuje.

Dvouvinut'ové transformátory

Sousledné zkratové impedance dvouvinut'ových transformátorů $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ s odbočkami regulovatelnými při zatížení nebo bez nich je možné vypočítat ze jmenovitých údajů transformátoru následovně:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (\Omega; \% ; \text{kV}; \text{MVA}) \quad (3.20)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (\Omega; \text{MW}; \text{kV}; \text{MVA}) \quad (3.21)$$

$$X_{T(1)} = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (\Omega; \Omega; \Omega) \quad (3.22)$$

kde U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí,

I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí,

S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru,

P_{rT} jmenovité ztráty nakrátko transformátoru,

u_{kr} jmenovité napětí nakrátko v procentech,

u_{Rr} činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech.

Trojvinut'ové transformátory

V případě trojvinut'ových transformátorů lze sousledné zkratové impedance \underline{Z}_A , \underline{Z}_B a \underline{Z}_C podle obr. 9 vypočítat pomocí tří zkratových impedancí (vztažených na stranu A transformátoru):

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (\Omega) \quad (3.23)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (\Omega) \quad (3.24)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (\Omega) \quad (3.25)$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (3.26)$$

Potom pomocí vzorců:

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (\Omega; \Omega; \Omega; \Omega) \quad (3.27)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (\Omega; \Omega; \Omega; \Omega) \quad (3.28)$$

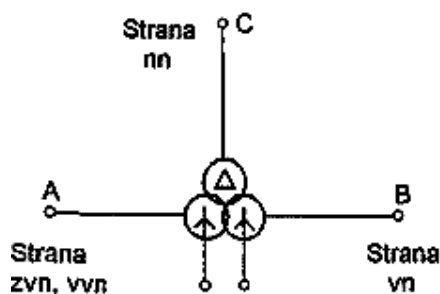
$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (\Omega; \Omega; \Omega; \Omega) \quad (3.29)$$

kde U_{rTA} je jmenovité napětí na straně A,

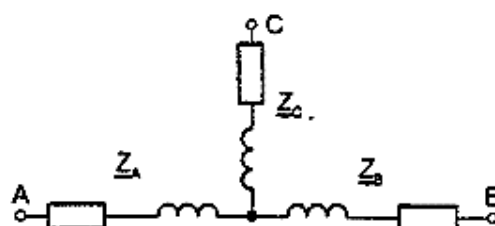
S_{rTAB} jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B,

S_{rTAC} jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C,

S_{rTBC}	jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C,
u_{RrAB}, u_{XrAB}	jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a B,
u_{RrAC}, u_{XrAC}	jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a C,
u_{RrBC}, u_{XrBC}	jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami B a C.



a) Označení zapojení vinutí



b) Náhradní schéma (sousedné složkové soustavy)

obr. 9 Trojvinutový transformátor

Korekční součinitelé pro impedance dvou- a trojvinutových síťových transformátorů:

Síťový transformátor je transformátor spojující dvě nebo více sítí s rozdílným napětím. U dvouvinutových transformátorů s přepínačem odboček při zatížení i bez něj se musí navíc k impedancím zavést korekční součinitel K_T : $\underline{Z}_{TK} = K_T \cdot \underline{Z}_T$ kde $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$.

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (-) \quad (3.30)$$

kde x_T je poměrná reaktance transformátoru $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$ a c_{\max} (viz. tabulka 1) odpovídá jmenovitému napětí sítě připojené ke straně nižšího napětí síťového transformátoru. Tento korekční součinitel se nesmí použít pro blokové transformátory.

U trojvinutových transformátorů s přepínačem odboček při zatížení a bez něho se tři impedanční korekční součinitelé mohou určit použitím poměrných hodnot reaktancí transformátorů:

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (-) \quad (3.31)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (-) \quad (3.32)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} \quad (-) \quad (3.33)$$

Reaktory omezující zkratový proud

Reaktory omezující zkratový proud se považují za součást zkratové impedance.

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100\%} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{rR}} \quad (\Omega; \% ; V; A) \quad \text{a} \quad R_R \ll X_R \quad (3.34)$$

kde u_{kR} je impedanční napětí reaktoru,

I_{rR} jmenovitý proud reaktoru,

U_n jmenovité napětí soustavy.

Rezistanci reaktoru můžeme proti jeho reaktanci zanedbat, neboť je nepatrná ($R = 0,001 X$), takže $Z_R = X_R$. [3]

Kabely

Souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ lze vypočítat z parametrů vodiče, jako jsou průřezy a rozteče vodičů.

Hodnoty rezistancí a reaktancí lze také vypočítat z následujících vztahů:

$$X_K = X_k \cdot l \quad (\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{km}) \quad (3.35)$$

$$R_K = R_k \cdot l \quad (\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{km}) \quad (3.36)$$

kde X_k je reaktance sousledné složky kabelu,

R_k odpor sousledné složky kabelu,

l délka kabelu.

Asynchronní motor

Motory vysokého napětí a nízkého napětí přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I_k'' , nárazovému zkratovému proudu i_p , k souměrnému zkratovému vypínacímu proudu I_b a u nesouměrných zkratů také k ustálenému zkratovému proudu I_k .

Impedance $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ asynchronních motorů v sousledné a zpětné složkové soustavě lze určit pomocí:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (\Omega) \quad (3.37)$$

kde U_{rM} je jmenovité napětí motoru,

I_{rM} jmenovitý proud motoru,

S_{rM} jmenovitý zdánlivý příkon motoru ($S_{rM} = P_{rM} / (\eta_{rM} \cdot \cos \varphi_{rM})$),

I_{LR} / I_{rM} poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu při zabrzděném motoru.

Jestliže je znám R_M/X_M , pak X_M se vypočítá následovně:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M / X_M)^2}} \quad (\Omega) \quad (3.38)$$

Následující vztahy lze použít s dostatečnou přesností:

$R_M/X_M = 0,10$ s $X_M = 0,995 \cdot Z_M$	pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $\geq 1\text{MW}$,
$R_M/X_M = 0,15$ s $X_M = 0,989 \cdot Z_M$	pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $< 1\text{MW}$,
$R_M/X_M = 0,42$ s $X_M = 0,922 \cdot Z_M$	pro skupiny nízkonapěťových motorů včetně připojovacích kabelů.

Parametry jednotlivých prvků musíme přepočítat na napěťovou hladinu v místě zkratu podle vztahu:

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (\Omega; \Omega; \text{kV}; \text{kV}) \quad (3.39)$$

kde Z_2 je impedance přepočtena na napěťovou hladinu U_2 v místě zkratu,
 Z_1 impedance na napěťové hladině U_1 . [8]

3.8.3. Jouleův integrál a ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Integrál $\int i^2 dt$ určuje energii vytvářenou v odporovém prvku soustavy průchodem zkratového proudu. Je vypočítána použitím součinitele m pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu a součinitele n pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu. [3]

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k'^2 \cdot (m + n) \cdot T_k = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (3.40)$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud je:

$$I_{th} = I_k' \cdot \sqrt{m + n} \quad (\text{kA}) \quad (3.41)$$

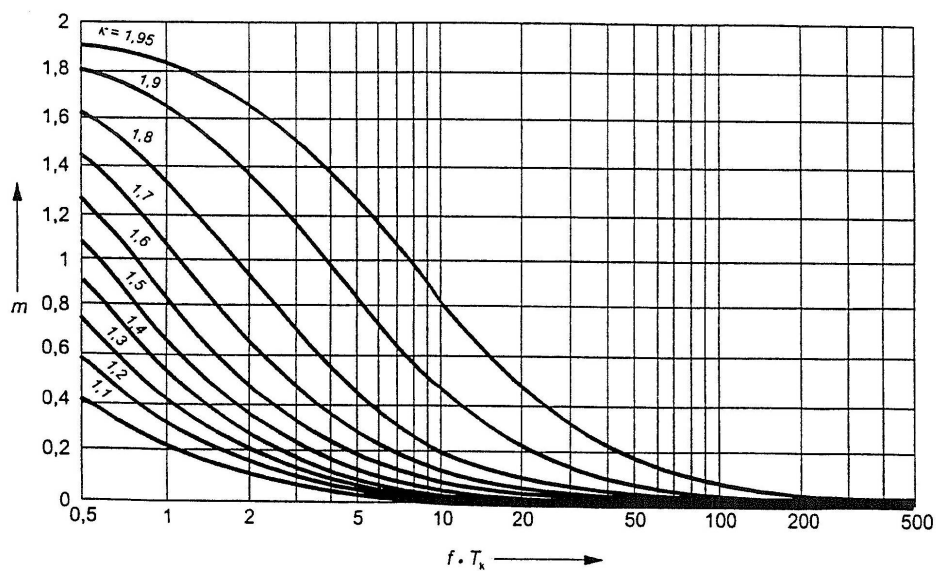
kde m je součinitel pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu (viz. obr. 10),

n součinitel pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu (viz. obr. 11),

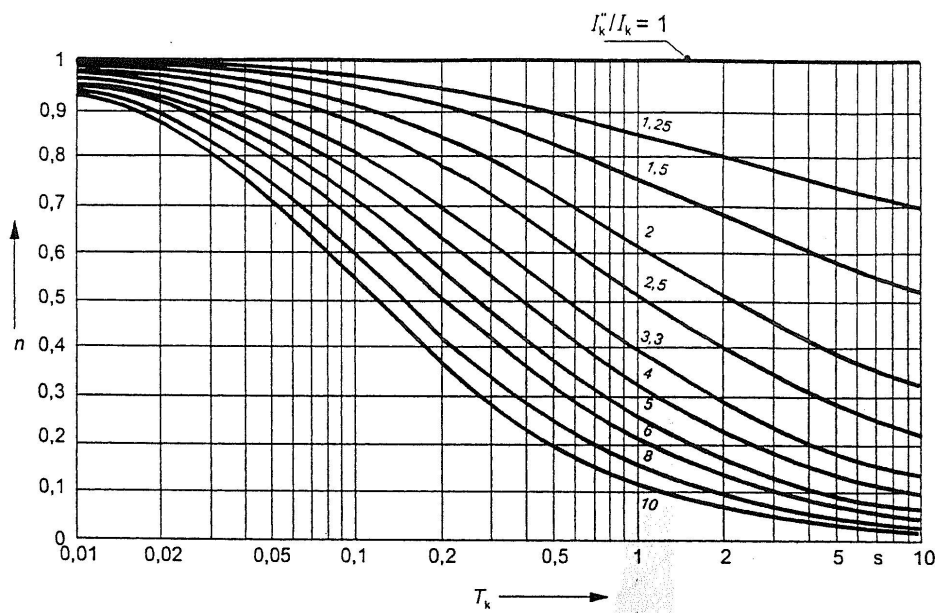
I_k' počáteční souměrný trojfázový rázový zkratový proud,

I_{th} ekvivalentní oteplovací zkratový proud,

T_k doba trvání zkratu.



obr. 10 Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu



obr. 11 Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

4. Popis provozního zapojení sítě průmyslového podniku

4.1. Varianta 1 – napájení z rozvodny R110 kV

Pro tuto variantu je hlavní a napájecí rozvodnou průmyslového podniku rozvodna R110 kV, ve které se pomocí trojvinutového transformátoru T101 transformuje napětí z hladiny 110 kV na hladinu 22 kV pro rozvodnu RVN 0.1, a na hladinu 6 kV pro rozvodnu RVN 0.0. Rozvodna RVN 0.1 je spojena s transformátorem T101 kabelovým vedením.

K rozvodně RVN 0.0 jsou připojeny dva generátory TG1 a TG2, a dále přes reaktory L8, L7 a L9 a kabelové vedení rozvodny RVN 0.2, RVN 0.3 a RVS1 – teplárna.

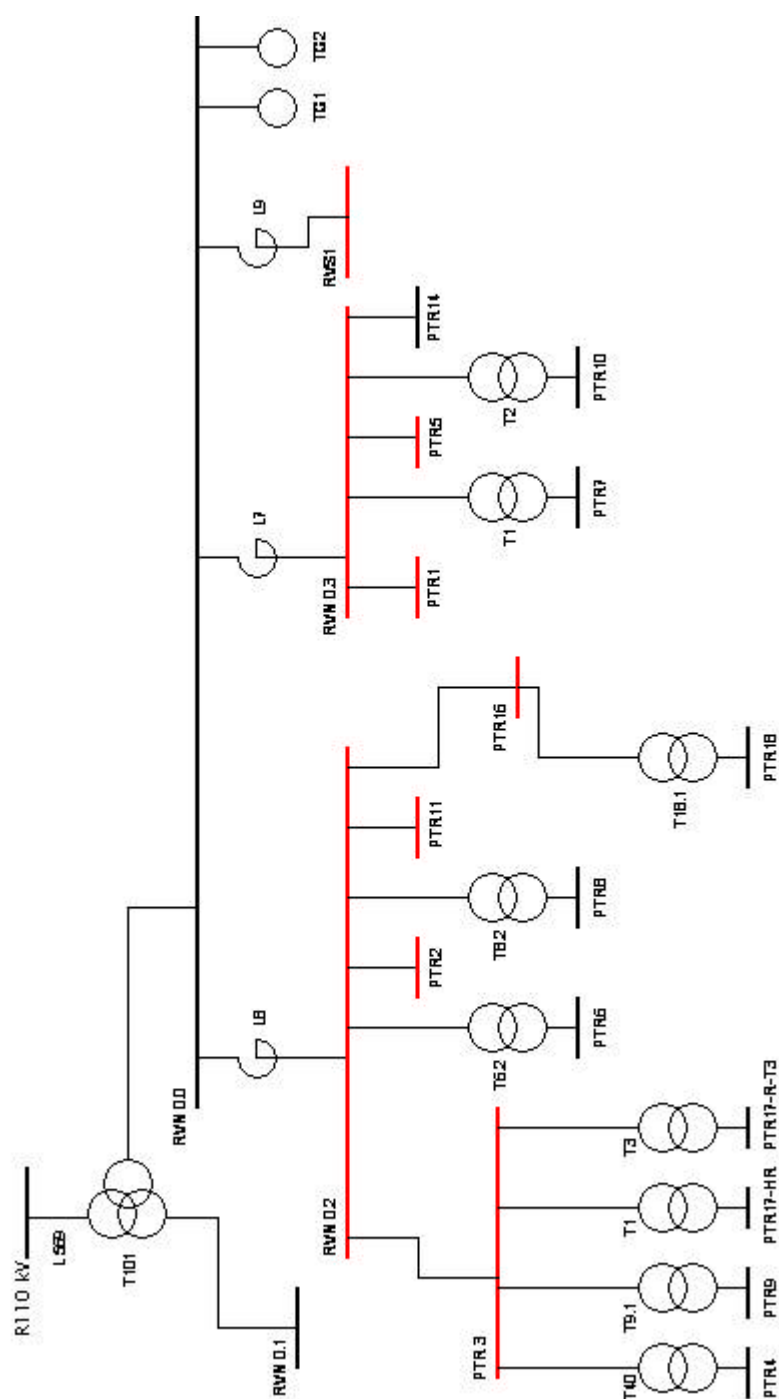
Rozvodna RVN 0.2 je kabely spojena a napájí rozvodny vn PTR3, PTR2, PTR11 a PTR16. Dále napájí transformátory T6.2 a T8.2, které transformují napětí z hladiny 6 kV na hladinu nízkého napětí 0,4 kV. Na straně nn jsou pak umístěny rozvodny PTR6 a PTR8.

Rozvodna PTR3 napájí přes další transformátory 6/0,4 kV rozvodny nízkého napětí PTR4, PTR9, PTR17-HR a PTR17-R-T3.

K rozvodně PTR16 je kabelem připojen transformátor T18.1 s transformací 6/0,4 kV, který napájí rozvodnu nn PTR18.

Rozvodna RVN 0.3 napájí kabelovým vedením rozvodny vn PTR1, PTR5 a PTR14. Pak také přes transformátory T1 a T2 rozvodny PTR7 a PTR10 na hladině 0,4 kV.

K rozvodnám vn RVN 0.2, RVN 0.3, RVS1 – teplárna, PTR1, PTR2, PTR3, PTR5, PTR11 a PTR16 jsou připojeny vysokonapěťové motory. Tyto rozvodny jsou označeny červenou barvou (viz. obr. 12).

Schéma zapojení - varianta 1:

obr. 12 Varianta 1 - Napájení z rozvodny R110 kV

4.2. Varianta 2 – napájení z rozvodny R22 kV

Varianta 2 se liší od předešlé varianty jen změnou v přívodním napájení. Průmyslový podnik je napájen z rozvodny R22 kV. Ta je spojena s rozvodnou RVN 0.1 vedením VN 213. Toto vedení je z větší části vedeno jako venkovní, a v blízkosti rozvodny RVN 0.1 přechází na kabelové. K rozvodně RVN 0.1 je kabelem připojen trojvinutový transformátor T101, který transformuje napětí 22 kV na hladinu 6 kV a dále napájí rozvodnu RVN 0.0.

K rozvodně RVN 0.0 jsou připojeny dva generátory TG1 a TG2, a dále přes reaktory L8, L7 a L9 a kabelové vedení rozvodny RVN 0.2, RVN 0.3 a RVS1 – teplárna.

Rozvodna RVN 0.2 je kabelem spojena a napájí rozvodny vn PTR3, PTR2, PTR11 a PTR16. Dále napájí transformátory T6.2 a T8.2, které transformují napětí z hladiny 6 kV na hladinu nízkého napětí 0,4 kV. Na straně nn jsou pak umístěny rozvodny PTR6 a PTR8.

Rozvodna PTR3 napájí přes další transformátory 6/0,4 kV rozvodny nízkého napětí PTR4, PTR9, PTR17-HR a PTR17-R-T3.

K rozvodně PTR16 je kabelem připojen transformátor T18.1 s transformací 6/0,4 kV, který napájí rozvodnu nn PTR18.

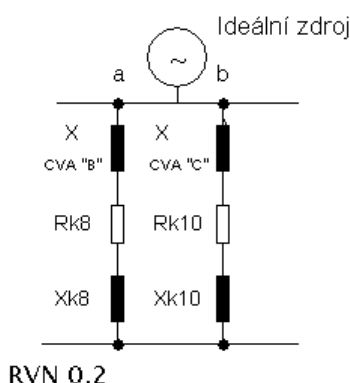
Rozvodna RVN 0.3 napájí kabelovým vedením rozvodny vn PTR1, PTR5 a PTR14. Pak také přes transformátory T1 a T2 rozvodny PTR7 a PTR10 na hladině 0,4 kV.

K rozvodnám vn RVN 0.2, RVN 0.3, RVS1 – teplárna, PTR1, PTR2, PTR3, PTR5, PTR11 a PTR16 jsou připojeny vysokonapěťové motory. Tyto rozvodny jsou označeny červenou barvou (viz. obr. 13).

5. Výpočet maximálních zkratových poměrů na rozvodnách vn a nn

5.1. Příspěvky motorů na rozvodny vn

Výpočet příspěvku motoru na rozvodnu RVN 0.2:



Náhradní schéma

obr. 14 Motory na rozvodně RVN 0.2

Příklad výpočtu rezistance a reaktance kabelů: (vstupní hodnoty jsou uvedeny v příloze)

$$R_{K8} = R_k \cdot l = 0,125 \cdot 0,220 = 0,0275 \Omega$$

$$R_{K10} = R_k \cdot l = 0,125 \cdot 0,240 = 0,03 \Omega$$

$$X_{K8} = X_k \cdot l = 0,0879 \cdot 0,220 = 0,0193 \Omega$$

$$X_{K10} = X_k \cdot l = 0,0879 \cdot 0,240 = 0,0211 \Omega$$

Příklad výpočtu reaktance motorů:

$$Z_{MCVA''B''} = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 47,8} = 14,494 \Omega$$

$$Z_{MCVA''C''} = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 29,1} = 23,808 \Omega$$

$$X_{CVA''B''} = 0,989 \cdot Z_{MCVA''B''} = 0,989 \cdot 14,494 = 14,335 \Omega$$

$$X_{CVA''C''} = 0,989 \cdot Z_{MCVA''C''} = 0,989 \cdot 23,808 = 23,546 \Omega$$

Příklad výpočtu výsledné impedance:

$$Z_a = R_{k8} + jX_{k8} + jX_{CVA''B''} = 0,0275 + j0,0193 + j14,335 = \underline{0,0275 + j14,354 \Omega}$$

$$Z_b = R_{k10} + jX_{k10} + jX_{CVA''C''} = 0,03 + j0,0211 + j23,546 = \underline{0,03 + j23,567 \Omega}$$

$$Z_{M\ RVN0.2} = \frac{1}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b}} = \frac{1}{\frac{1}{0,0275 + j14,354} + \frac{1}{0,03 + j23,567}} = \underline{\underline{0,0149 + j8,9207\Omega}}$$

Absolutní hodnota:

$$|Z_{M\ RVN0.2}| = \sqrt{R_M^2 + X_M^2} = \sqrt{0,0149^2 + 8,9207^2} = \underline{\underline{8,92077\Omega}}$$

Příspěvek maximálního počátečního rázového zkratového proudu na rozvodnu RVN 0.2:

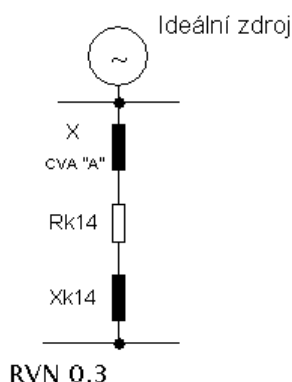
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{M\ RVN0.2}|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 8,92077} = \underline{\underline{0,427\ kA}}$$

Příspěvek maximálního zkratového výkonu od motorů na rozvodnu RVN0.2:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,427 = \underline{\underline{4,439\ MVA}}$$

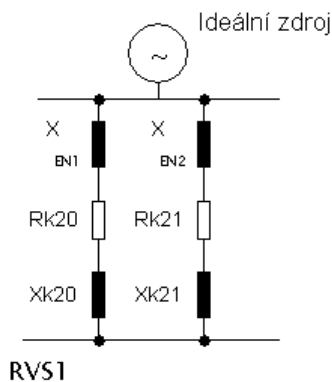
U ostatních rozvodů s motory jsou výpočty obdobné, a proto v dalším bude uvedeno vždy jen náhradní schéma a výsledný příspěvek motorů na rozvodnu.

Příspěvek motoru na rozvodnu RVN 0.3:

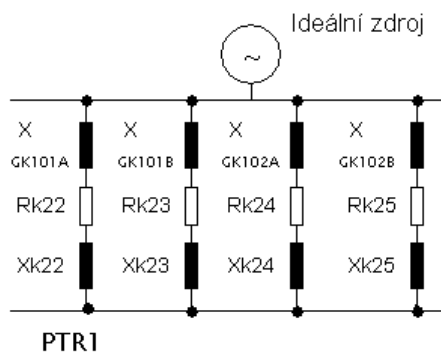


obr. 15 Náhradní schéma příspěvku motoru na RVN 0.3

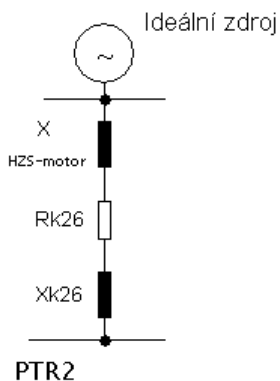
Rozvodna	$Z_{M\ RVN0.3}$	$ Z_{M\ RVN0.3} $	$I''_{k3\max}$	$S''_{k3\max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
RVN 0.3	0,02625+j14,3532	14,3532	0,265	2,759

Příspěvek motorů na rozvodnu RVS1 - teplárna:**obr. 16 Náhradní schéma příspěvku motorů na RVS1 – teplárnu**

Rozvodna	$Z_{M \text{ RVS1-teplárna}}$	$ Z_{M \text{ RVS1-teplárna}} $	$I''_{k3 \max}$	$S''_{k3 \max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
RVS1 - teplárna	0,009269+j6,9253	6,9253	0,550	5,718

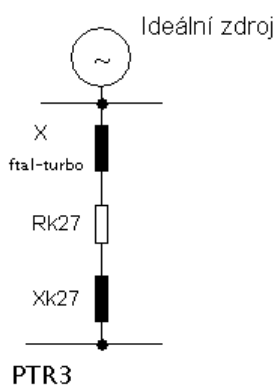
Příspěvek motorů na rozvodnu PTR1:**obr. 17 Náhradní schéma příspěvku motorů na rozvodnu PTR1**

Rozvodna	$Z_{M \text{ PTR1}}$	$ Z_{M \text{ PTR1}} $	$I''_{k3 \max}$	$S''_{k3 \max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
PTR1	0,02251+j2,1344	2,1345	1,785	18,552

Příspěvek motoru na rozvodnu PTR2:

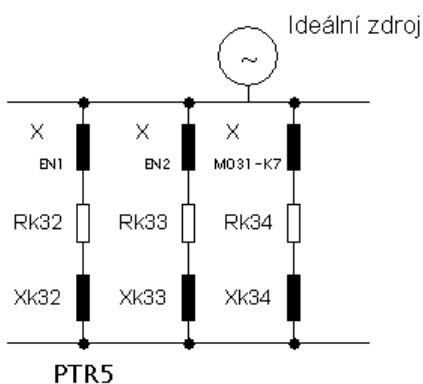
obr. 18 Náhradní schéma příspěvku motoru na rozvodnu PTR2

Rozvodna	$Z_{M \ PTR \ 2}$	$ Z_{M \ PTR \ 2} $	$I''_{k3 \ max}$	$S''_{k3 \ max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
PTR2	0,0614+j19,6603	19,6604	0,194	2,014

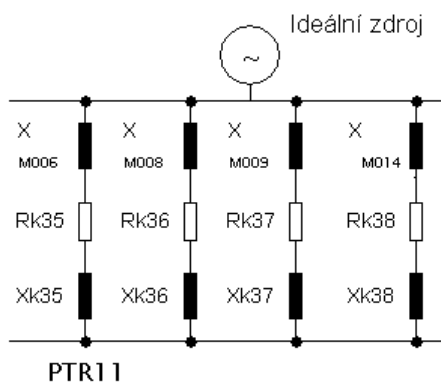
Příspěvek motoru na rozvodnu PTR3:

obr. 19 Náhradní schéma příspěvku motoru na rozvodnu PTR3

Rozvodna	$Z_{M \ PTR \ 3}$	$ Z_{M \ PTR \ 3} $	$I''_{k3 \ max}$	$S''_{k3 \ max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
PTR3	0,0676+j4,3383	4,3388	0,878	9,127

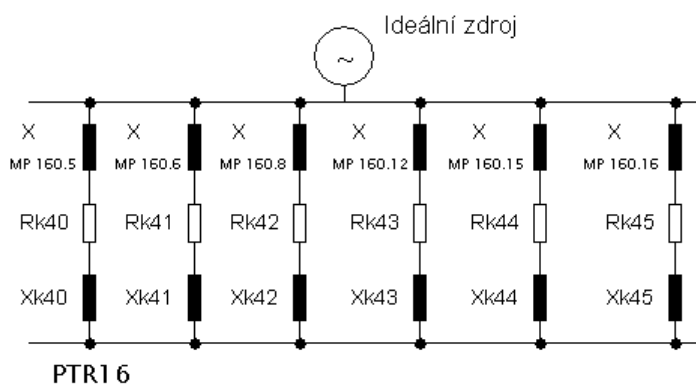
Příspěvek motorů na rozvodnu PTR5:**obr. 20 Náhradní schéma příspěvku motorů na rozvodnu PTR5**

Rozvodna	$Z_{M\ PTR\ 5}$	$ Z_{M\ PTR\ 5} $	$I''_{k3\ max}$	$S''_{k3\ max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
PTR5	0,0136+j8,1245	8,1245	0,469	4,874

Příspěvek motorů na rozvodnu PTR11:**obr. 21 Náhradní schéma příspěvku motorů na rozvodnu PTR11**

Rozvodna	$Z_{M\ PTR\ 11}$	$ Z_{M\ PTR\ 11} $	$I''_{k3\ max}$	$S''_{k3\ max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
PTR11	0,00155+j3,2358	3,2358	1,178	12,238

Příspěvek motorů na rozvodnu PTR16:

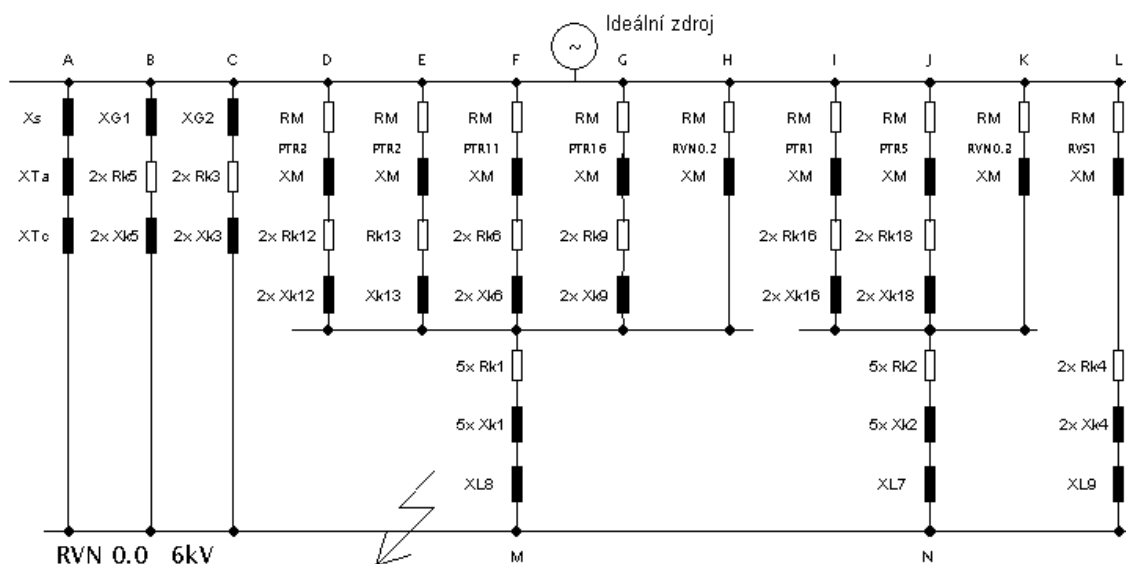


obr. 22 Náhradní schéma příspěvku motorů na rozvodnu PTR16

Rozvodna	$Z_{M \text{ PTR16}}$	$ Z_{M \text{ PTR16}} $	$I''_{k3 \max}$	$S''_{k3 \max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
PTR16	0,0032+j2,7389	2,7389	1,391	14,458

5.2. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.0 – varianta 1

Ze sestaveného náhradního schématu se určí postupným zjednodušováním výsledná impedance, ze které se pomocí vzorců vypočtou výsledné zkratové poměry.



obr. 23 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVN 0.0

Příklad výpočtů rezistancí a reaktancí prvků náhradního schématu:

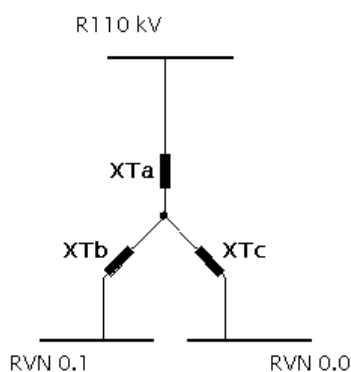
(Vstupní data a výsledky všech prvků jsou uvedeny v příloze).

Reaktance nadřazené soustavy 110kV: (přepočtená na napěťovou hladinu v místě zkratu)

Maximální zkratový výkon na rozvodně R110 kV byl dán 1198,3 MVA.

$$X_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k3 \max}''} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{1198,3} \cdot \left(\frac{6}{110} \right)^2 = 0,033 \Omega$$

Reaktance trojvintňového transformátoru T101:



obr. 24 Označení stran trojvintňového transformátoru

$$X'_{AB} = \frac{u_{rAB}}{100} \cdot \frac{U_{rTC}^2}{S_{rTAB}} = \frac{9,4}{100} \cdot \frac{6^2}{25} = 0,1354 \Omega$$

$$X'_{BC} = \frac{u_{rBC}}{100} \cdot \frac{U_{rTC}^2}{S_{rTBC}} = \frac{5,67}{100} \cdot \frac{6^2}{25} = 0,0816 \Omega$$

$$X'_{CA} = \frac{u_{rCA}}{100} \cdot \frac{U_{rTC}^2}{S_{rTCA}} = \frac{16,47}{100} \cdot \frac{6^2}{25} = 0,2372 \Omega$$

Výpočet korekčních součinitelů:

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,094} = 0,9892$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0567} = 1,0106$$

$$K_{TCA} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TCA}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,1647} = 0,951$$

Potom:

$$X_{AB} = X'_{AB} \cdot K_{TAB} = 0,1354 \cdot 0,9892 = 0,1339 \Omega$$

$$X_{BC} = X'_{BC} \cdot K_{TBC} = 0,0816 \cdot 1,0106 = 0,0825 \Omega$$

$$X_{CA} = X'_{CA} \cdot K_{TCA} = 0,2372 \cdot 0,951 = 0,2255 \Omega$$

Z toho pak:

$$X_{Ta} = \frac{1}{2} \cdot (X_{AB} + X_{AC} - X_{BC}) = \frac{1}{2} \cdot (0,1339 + 0,2255 - 0,0825) = 0,1385 \Omega$$

$$X_{Tb} = \frac{1}{2} \cdot (X_{AB} + X_{BC} - X_{AC}) = \frac{1}{2} \cdot (0,1339 + 0,0825 - 0,2255) = 0,0045 \Omega$$

$$X_{Tc} = \frac{1}{2} \cdot (X_{AC} + X_{BC} - X_{AB}) = \frac{1}{2} \cdot (0,2255 + 0,0825 - 0,1339) = 0,0871 \Omega$$

Reaktance generátorů G1 a G2:

$$X_{G1} = \frac{x_d'' \cdot U_{nG1}^2}{100 \cdot S_{nG1}} = \frac{12,65 \cdot 6^2}{100 \cdot 5} = 0,9108 \Omega$$

$$X_{G2} = \frac{x_d'' \cdot U_{nG2}^2}{100 \cdot S_{nG2}} = \frac{13,6 \cdot 6^2}{100 \cdot 15} = 0,3264 \Omega$$

Reaktance reaktorů L7, L8 a L9:

$$X_{L7} = \frac{u_{kR}}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{L7}} = \frac{8,7}{100} \cdot \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1500} = 0,2009 \Omega$$

$$X_{L8} = \frac{u_{kR}}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{L8}} = \frac{8,7}{100} \cdot \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1500} = 0,2009 \Omega$$

$$X_{L9} = \frac{u_{kR}}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{L9}} = \frac{5,42}{100} \cdot \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 630} = 0,298 \Omega$$

Rezistance a reaktance kabelu K5:

(Pro přehlednost je uveden jen postup při výpočtu kabelu K5. Výpočet ostatních kabelů je obdobný, výsledky jsou uvedeny v příloze. Hodnoty rezistancí R_k a reaktancí X_k byly získány z tabulek).

$$R_{K5} = \frac{1}{2} \cdot R_{k5} \cdot l_5 = \frac{1}{2} \cdot 0,125 \cdot 0,08 = 0,005 \Omega$$

$$X_{K5} = \frac{1}{2} \cdot X_{k5} \cdot l_5 = \frac{1}{2} \cdot 0,08792 \cdot 0,08 = 0,00352 \Omega$$

Výpočet celkové impedance:

$$Z_A = X_S + X_{Ta} + X_{Tc} = j0,033 + j0,1385 + j0,0871 = j0,2586 \Omega$$

$$Z_B = X_{G1} + R_{K5} + X_{K5} = j0,9108 + 0,005 + j0,003517 = 0,005 + j0,9143 \Omega$$

$$Z_C = X_{G2} + R_{K3} + X_{K3} = j0,3264 + 0,00375 + j0,00263 = 0,00375 + j0,3290 \Omega$$

$$Z_D = Z_{M PTR3} + R_{K12} + X_{K12} = 0,0676 + j4,3383 + 0,0325 + j0,02286 = 0,1 + j4,3612 \Omega$$

$$Z_E = Z_{M PTR 2} + R_{K13} + X_{K13} = 0,0614 + j19,6603 + 0,1437 + j0,1011 = 0,205 + j19,7614\Omega$$

$$Z_F = Z_{M PTR 11} + R_{K6} + X_{K6} = 0,00155 + j3,2358 + 0,05 + j0,03517 = 0,0515 + j3,2709\Omega$$

$$Z_G = Z_{M PTR 16} + R_{K9} + X_{K9} = 0,0032 + j2,7389 + 0,0591 + j0,04154 = 0,0622 + j2,7805\Omega$$

$$Z_H = Z_{M RVN 0,2} = 0,0149 + j8,9207\Omega$$

$$Z_I = Z_{M PTR 1} + R_{K16} + X_{K16} = 0,02251 + j2,1344 + 0,03875 + j0,02726 = 0,0612 + j2,1617\Omega$$

$$Z_J = Z_{M PTR 5} + R_{K18} + X_{K18} = 0,0136 + j8,1245 + 0,06469 + j0,0455 = 0,0782 + j8,17\Omega$$

$$Z_K = Z_{M RVN 0,3} = 0,02625 + j14,3532\Omega$$

$$Z_L = Z_{M RVS 1} + R_{K4} + X_{K4} + X_{L9} = 0,0092 + j6,9253 + 0,00294 + j0,00207 + j0,298 = 0,0122 + j7,2254\Omega$$

$$Z_M = R_{K1} + X_{K1} + X_{L8} = 0,00113 + j0,00079 + j0,2009 = 0,00113 + j0,2017\Omega$$

$$Z_N = R_{K2} + X_{K2} + X_{L7} = 0,00095 + j0,00067 + j0,2009 = 0,00095 + j0,2016\Omega$$

Postupné zjednodušování:

$$Z_{A-C} = \frac{1}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} = \frac{1}{\frac{1}{j0,2586} + \frac{1}{0,005 + j0,9143} + \frac{1}{0,00375 + j0,329}} = 0,00063 + j0,125\Omega$$

$$Z_{D-H} = \frac{1}{\frac{1}{Z_D} + \frac{1}{Z_E} + \frac{1}{Z_F} + \frac{1}{Z_G} + \frac{1}{Z_H}} = \frac{1}{\frac{1}{0,1 + j4,3612} + \frac{1}{0,205 + j19,7614} + \frac{1}{0,0515 + j3,2709} + \frac{1}{0,0622 + j2,7805} + \frac{1}{0,0149 + j8,9207}} =$$

$$= 0,0168 + j0,9458\Omega$$

$$Z_{I-K} = \frac{1}{\frac{1}{Z_I} + \frac{1}{Z_J} + \frac{1}{Z_K}} = \frac{1}{\frac{1}{0,0612 + j2,1617} + \frac{1}{0,0782 + j8,17} + \frac{1}{0,02625 + j14,3532}} =$$

$$= 0,0336 + j1,5276\Omega$$

Pak:

$$Z_{D-H,M} = Z_{D-H} + Z_M = 0,0168 + j0,9458 + 0,00113 + j0,2017 = 0,0179 + j1,1475\Omega$$

$$Z_{I-K,N} = Z_{I-K} + Z_N = 0,0336 + j1,5276 + 0,00095 + j0,2016 = 0,0345 + j1,7292\Omega$$

Celková impedance:

$$\begin{aligned}
 Z_k &= \frac{1}{\frac{1}{Z_{A-C}} + \frac{1}{Z_{D-H,M}} + \frac{1}{Z_{I-K,N}} + \frac{1}{Z_L}} = \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{0,00063 + j0,125} + \frac{1}{0,0179 + j1,1475} + \frac{1}{0,0345 + j1,7292} + \frac{1}{0,0122 + j7,2254}} = \\
 &= \underline{\underline{0,0007 + j0,1043 \, \Omega}}
 \end{aligned}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0007^2 + 0,1043^2} = \underline{\underline{0,1043 \, \Omega}}$$

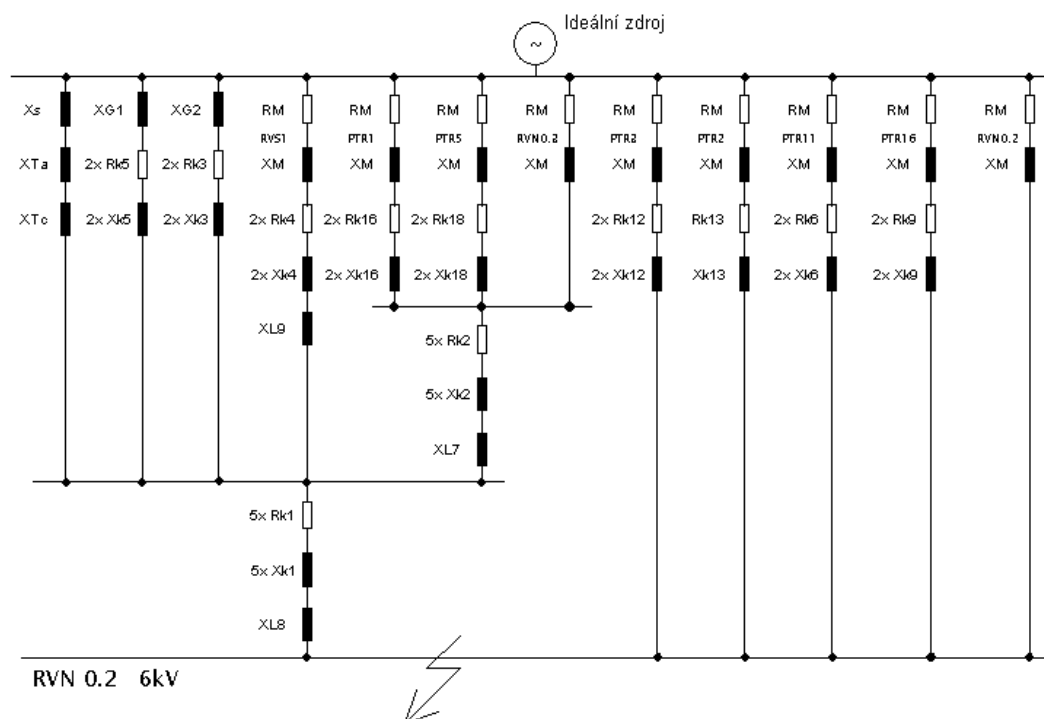
Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3 \max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,1043} = \underline{\underline{36,53 \, kA}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3 \max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3 \max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 36,53 = \underline{\underline{379,66 \, MVA}}$$

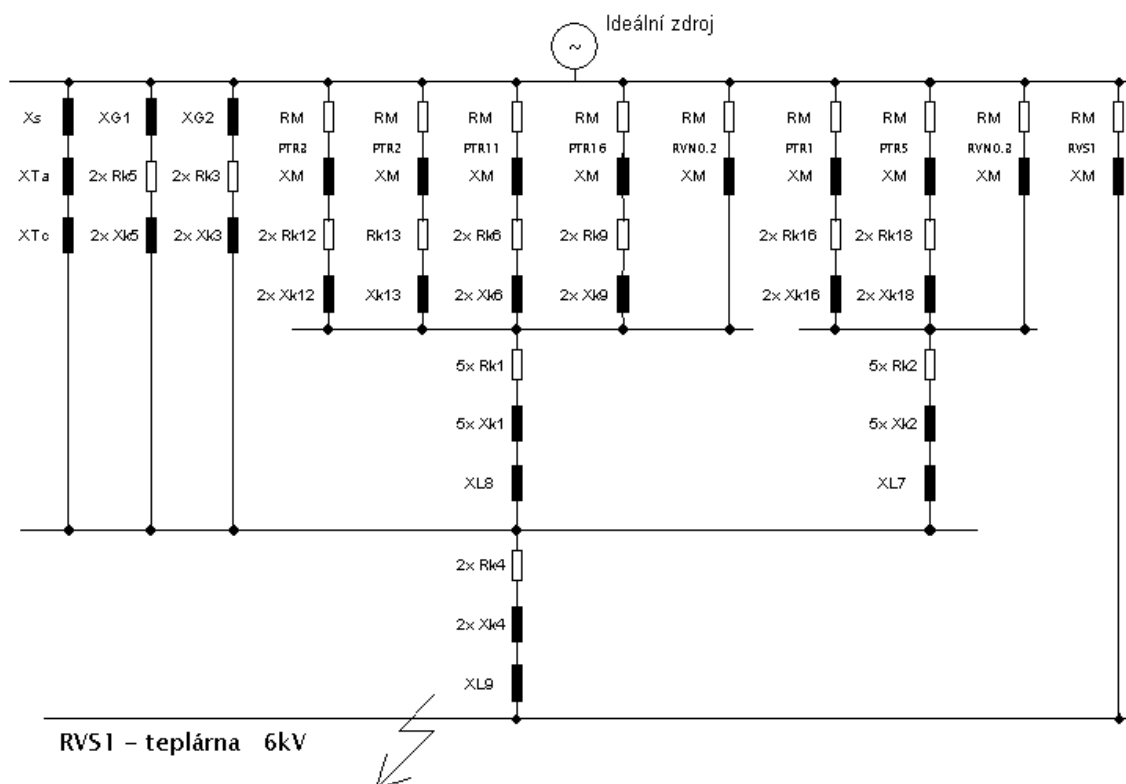
5.3. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.2 – varianta 1



obr. 25 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVN 0.2

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6,14,683 = \underline{\underline{152,598 \text{ MVA}}}$$

5.5. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVS1-teplárna – var. 1

obr. 27 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVS1

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0033^2 + 0,3834^2} = \underline{\underline{0,3834 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,3834} = \underline{\underline{9,937 \text{ kA}}}$$

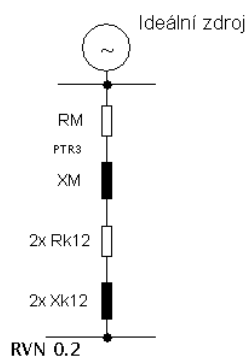
Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 9,937 = \underline{\underline{103,27 \text{ MVA}}}$$

5.6. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR3 – varianta 1

Při výpočtu na této i dalších rozvodnách je použito zjednodušení, kdy z hodnot zkratového proudu nadřazené rozvodny lze vypočítat hodnotu reaktance soustavy. Značně se tak zjednoduší náhradní schéma.

Na této rozvodně PTR3 se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.2, od které se ovšem musí odečíst příspěvek zkratového proudu od rozvodny PTR3 (viz. obr. 28).



obr. 28 Příspěvek zkratového proudu rozvodny PTR3 na rozvodu RVN 0.2

Výpočet impedance příspěvku od rozvodny PTR3:

$$Z_P = Z_{M\ PTR\ 3} + R_{K12} + X_{K12} = 0,0675 + j4,3383 + 0,0325 + j0,0228 = 0,1 + j4,3612\ \Omega$$

$$|Z_P| = \sqrt{0,1^2 + 4,3612^2} = 4,3623\ \Omega$$

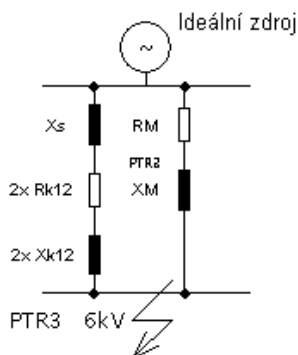
Z této impedance se vypočte příspěvek proudu:

$$I''_{kX} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_P|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 4,3623} = 0,8735\ kA$$

a tento proud se odečte od zkratového proudu na rozvodně RVN 0.2:

$$I''_{kS} = I''_{k\ RVN\ 0.2} - I''_{kX} = 16,069 - 0,873 = 15,196\ kA$$

Z proudu I''_{kS} se vypočte reaktanci nadřazené soustavy. Podobný postup je využit i u dalších rozvodnách.



obr. 29 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR3

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,029^2 + 0,2575^2} = \underline{\underline{0,2592 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

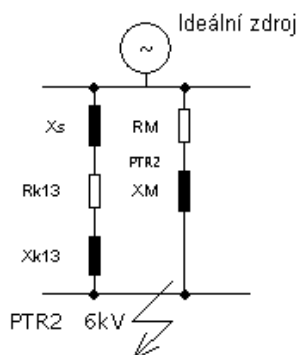
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2592} = \underline{\underline{14,703 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 14,703 = \underline{\underline{152,802 \text{ MVA}}}$$

5.7. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR2 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.2.



obr. 30 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR2

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,139^2 + 0,336^2} = \underline{\underline{0,3638 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

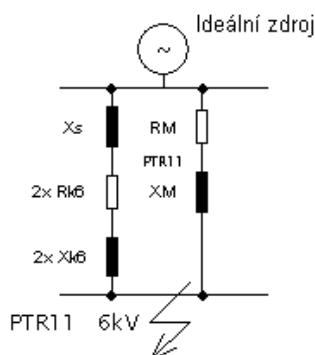
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,3638} = \underline{\underline{10,473 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10,473 = \underline{\underline{108,841 \text{ MVA}}}$$

5.8. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR11 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.2.



obr. 31 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR11

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,042^2 + 0,2674^2} = \underline{\underline{0,2707 \, \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

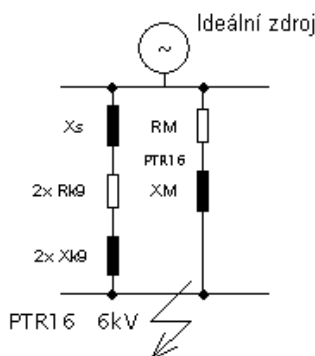
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2707} = \underline{\underline{14,075 \, kA}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 14,075 = \underline{\underline{146,274 \, MVA}}$$

5.9. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR16 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.2.



obr. 32 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR16

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,047^2 + 0,2719^2} = \underline{\underline{0,2761 \, \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

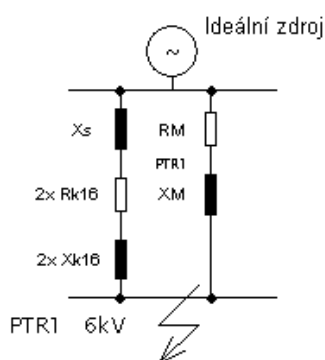
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2761} = \underline{\underline{13,799 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 13,799 = \underline{\underline{143,413 \text{ MVA}}}$$

5.10. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR1 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.3.



obr. 33 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR1

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,029^2 + 0,2802^2} = \underline{\underline{0,2818 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

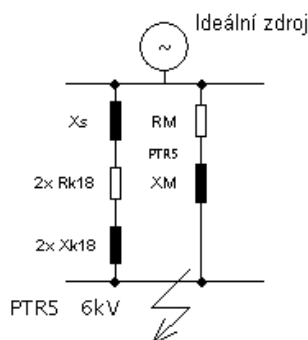
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2818} = \underline{\underline{13,519 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 13,519 = \underline{\underline{140,502 \text{ MVA}}}$$

5.11. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR5 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.3.



obr. 34 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR5

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,06^2 + 0,3023^2} = \underline{\underline{0,3082 \, \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,3082} = \underline{\underline{12,363 \, kA}}$$

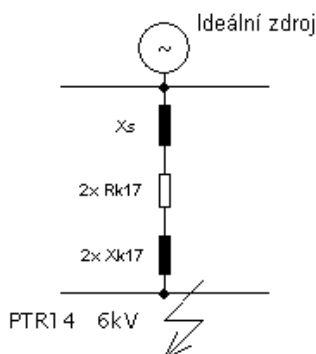
Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 12,363 = \underline{\underline{128,482 \, MVA}}$$

5.12. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR14 – varianta 1

U rozvodny PTR14 na hladině 6 kV se již neodečítá příspěvek zkratového proudu od zkratového proudu nadřazené rozvodny, protože na rozvodně PTR14 není žádný příspěvek zkratového proudu na rozvodnu RVN 0.3.

A proto se u rozvodny PTR14 vychází jen z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.3.



obr. 35 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR14

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0187^2 + 0,2727^2} = \underline{\underline{0,2733 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

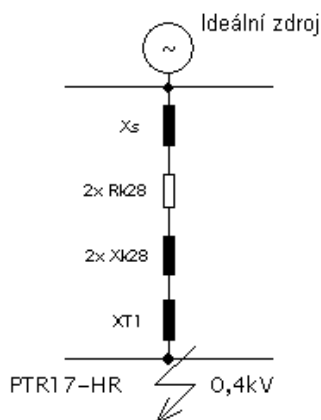
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2733} = \underline{\underline{13,940 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 13,940 = \underline{\underline{144,876 \text{ MVA}}}$$

5.13. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR17-HR – var. 1

U rozvodu nn se musí přepočítat reaktance soustavy, rezistance a reaktance kabelů a reaktance transformátoru na napěťovou hladinu v místě zkratu, tzn. 0,4 kV. U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny PTR3.



obr. 36 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR17-HR

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0002^2 + 0,0115^2} = \underline{\underline{0,0115 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

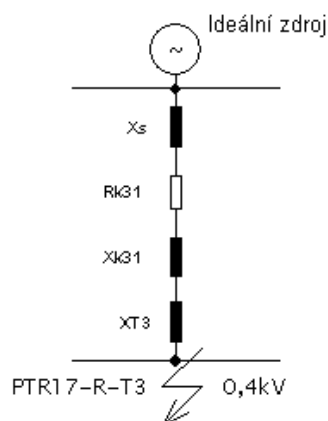
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0115} = \underline{\underline{20,985 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 20,958 = \underline{\underline{14,538 \text{ MVA}}}$$

5.14. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR17-R-T3 – var. 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny PTR3.



obr. 37 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR17-R-T3

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0003^2 + 0,0116^2} = \underline{\underline{0,0116 \, \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

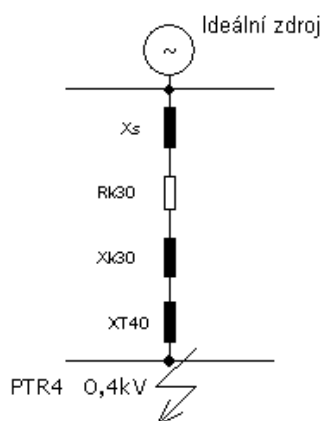
$$I''_{k3 \max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0116} = \underline{\underline{20,828 \, kA}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3 \max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3 \max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 20,828 = \underline{\underline{14,430 \, MVA}}$$

5.15. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR4 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny PTR3.



obr. 38 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR4

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0004^2 + 0,0117^2} = \underline{\underline{0,0117 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

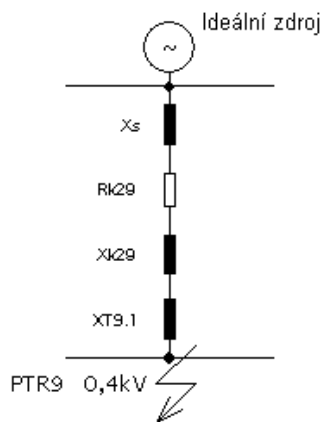
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0117} = \underline{\underline{20,694 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 20,694 = \underline{\underline{14,337 \text{ MVA}}}$$

5.16. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR9 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny PTR3.



obr. 39 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR9

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0008^2 + 0,0120^2} = \underline{\underline{0,0120 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

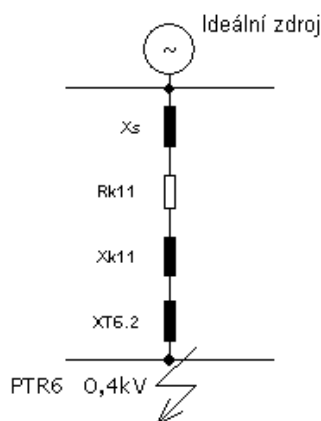
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0120} = \underline{\underline{20,185 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 20,185 = \underline{\underline{13,985 \text{ MVA}}}$$

5.17. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR6 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.2.



obr. 40 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR6

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,002^2 + 0,0123^2} = \underline{\underline{0,0125 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

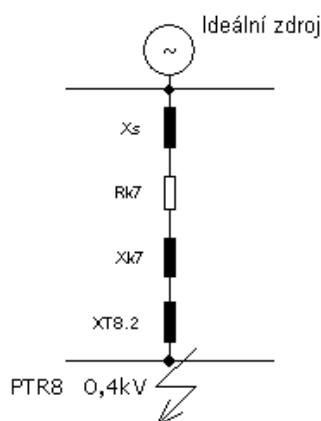
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0125} = \underline{\underline{19,332 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 19,332 = \underline{\underline{13,394 \text{ MVA}}}$$

5.18. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR8 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.2.



obr. 41 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR8

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0002^2 + 0,0115^2} = \underline{\underline{0,0115 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

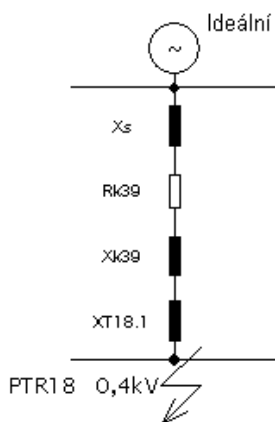
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0115} = \underline{\underline{20,932 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 20,932 = \underline{\underline{14,502 \text{ MVA}}}$$

5.19. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR18 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny PTR16.



obr. 42 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR18

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,001^2 + 0,0121^2} = \underline{\underline{0,0121 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

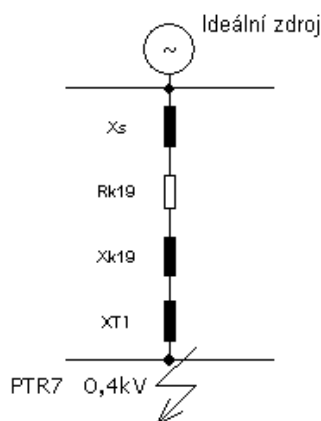
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0121} = \underline{\underline{19,906 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 19,906 = \underline{\underline{13,791 \text{ MVA}}}$$

5.20. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR7 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.3.



obr. 43 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR7

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0004^2 + 0,0125^2} = \underline{\underline{0,0125 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

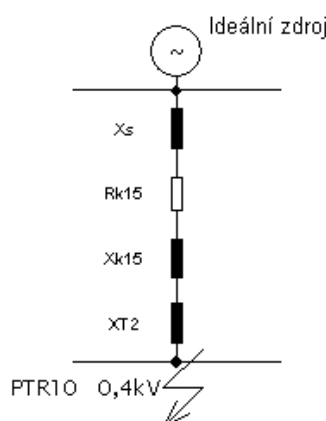
$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0125} = \underline{\underline{19,361 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 19,361 = \underline{\underline{13,413 \text{ MVA}}}$$

5.21. Maximální zkratové poměry na rozvodně PTR10 – varianta 1

U této rozvodny se vychází z hodnot nadřazené rozvodny RVN 0.3.



obr. 44 Náhradní schéma soustavy při zkratu na PTR10

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0001^2 + 0,0123^2} = \underline{\underline{0,0123 \, \Omega}}$$

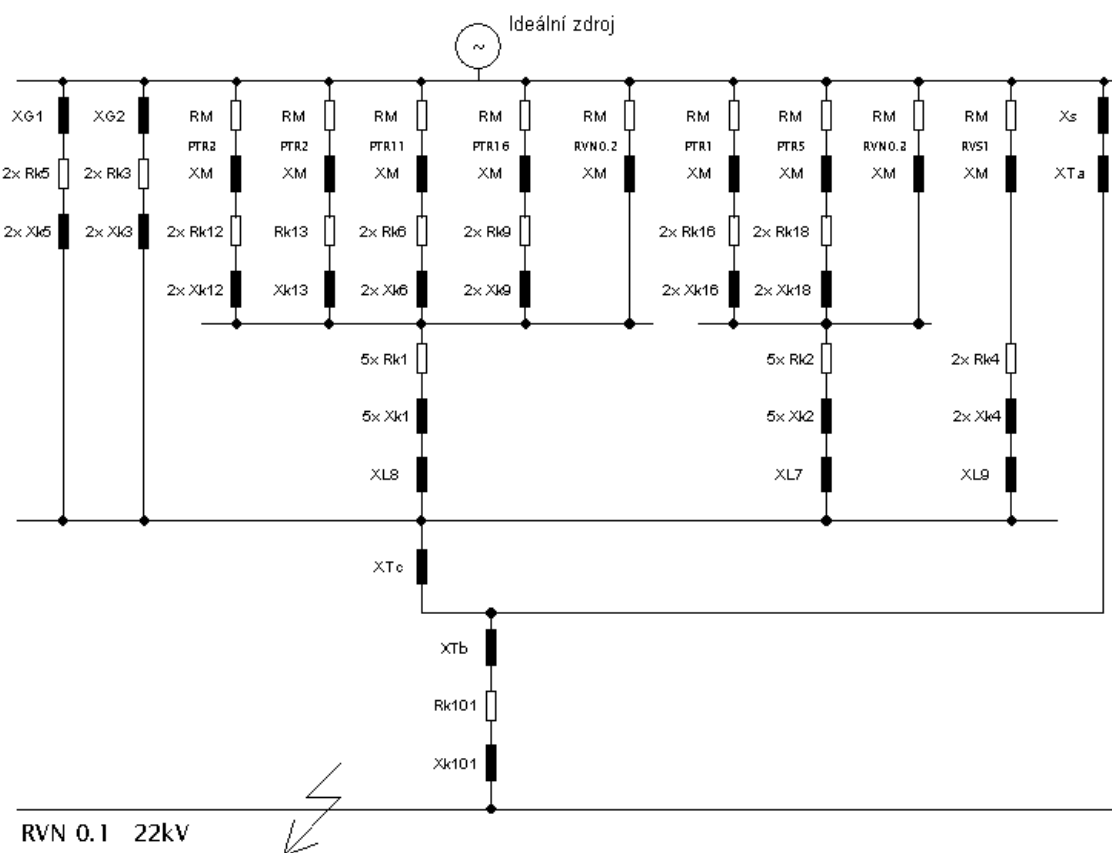
Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0123} = \underline{\underline{19,634 \, kA}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 19,634 = \underline{\underline{13,602 \, MVA}}$$

5.22. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.1 – varianta 1



obr. 45 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVN 0.1

Při výpočtu na této rozvodně se musí opět přepočítat všechny rezistance a reaktance na napětových hladinách 6 a 110 kV na napětovou hladinu v místě zkratu, tzn. na napětovou hladinu 22 kV.

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0147^2 + 1,3345^2} = 1,3346 \, \Omega$$

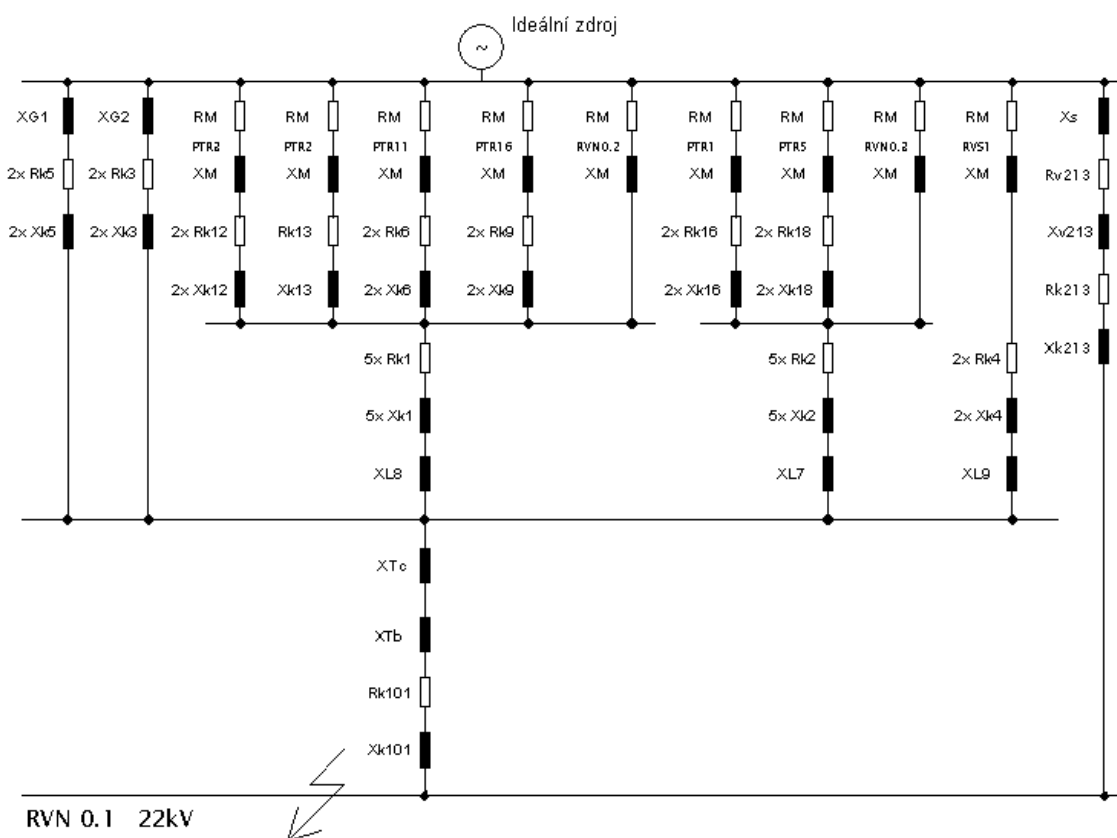
Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I_{k3\max}'' = \frac{c.U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1.22}{\sqrt{3} \cdot 1,3346} = \underline{\underline{10,468 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3 \max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3 \max} = \sqrt{3} \cdot 22,10,468 = 398,916 \text{ MVA}$$

5.23. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.1 – varianta 2



obr. 46 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVN 0.1

Příklad výpočtu reaktance nadřazené soustavy 22kV:

Maximální zkratový výkon na rozvodně R22 kV byl dán 300,2 MVA.

$$X_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k \max}} = \frac{1,1 \cdot 22^2}{300,2} = 1,773 \, \Omega$$

Všechny prvky soustavy se musí opět přepočítat na napěťovou hladinu v místě zkratu.

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,1813^2 + 1,4795^2} = \underline{\underline{1,4905 \Omega}}$$

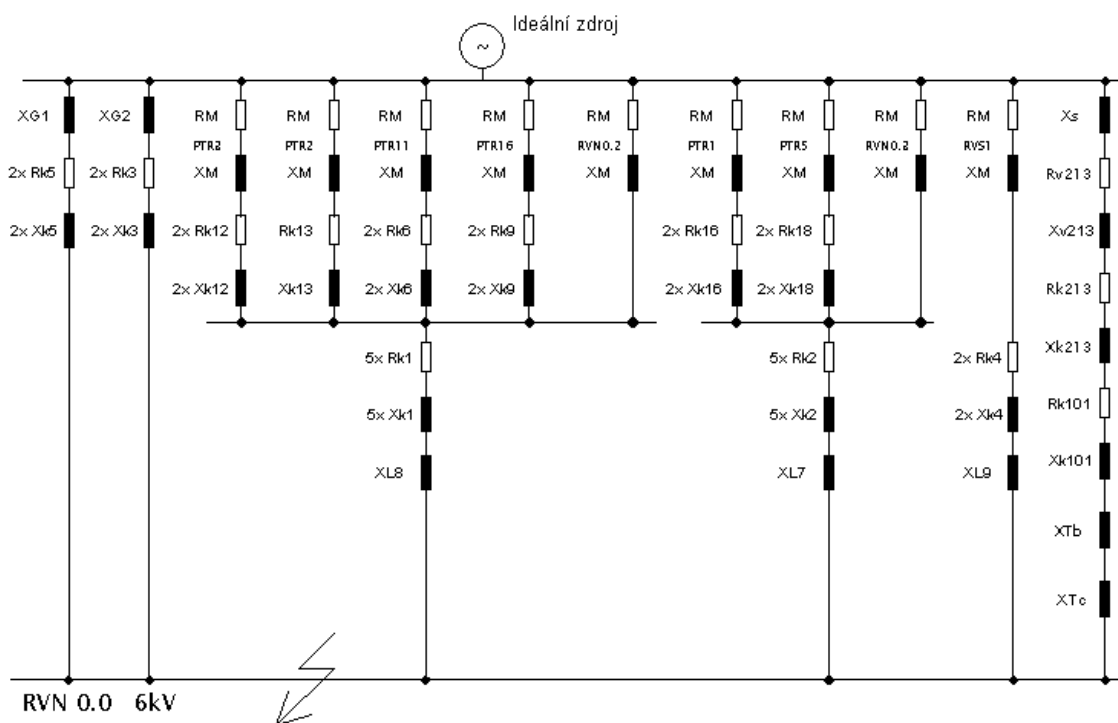
Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 1,4905} = \underline{\underline{9,373 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 9,373 = \underline{\underline{357,183 \text{ MVA}}}$$

5.24. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.0 – varianta 2



obr. 47 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVN 0.0

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0076^2 + 0,113^2} = \underline{\underline{0,1132 \Omega}}$$

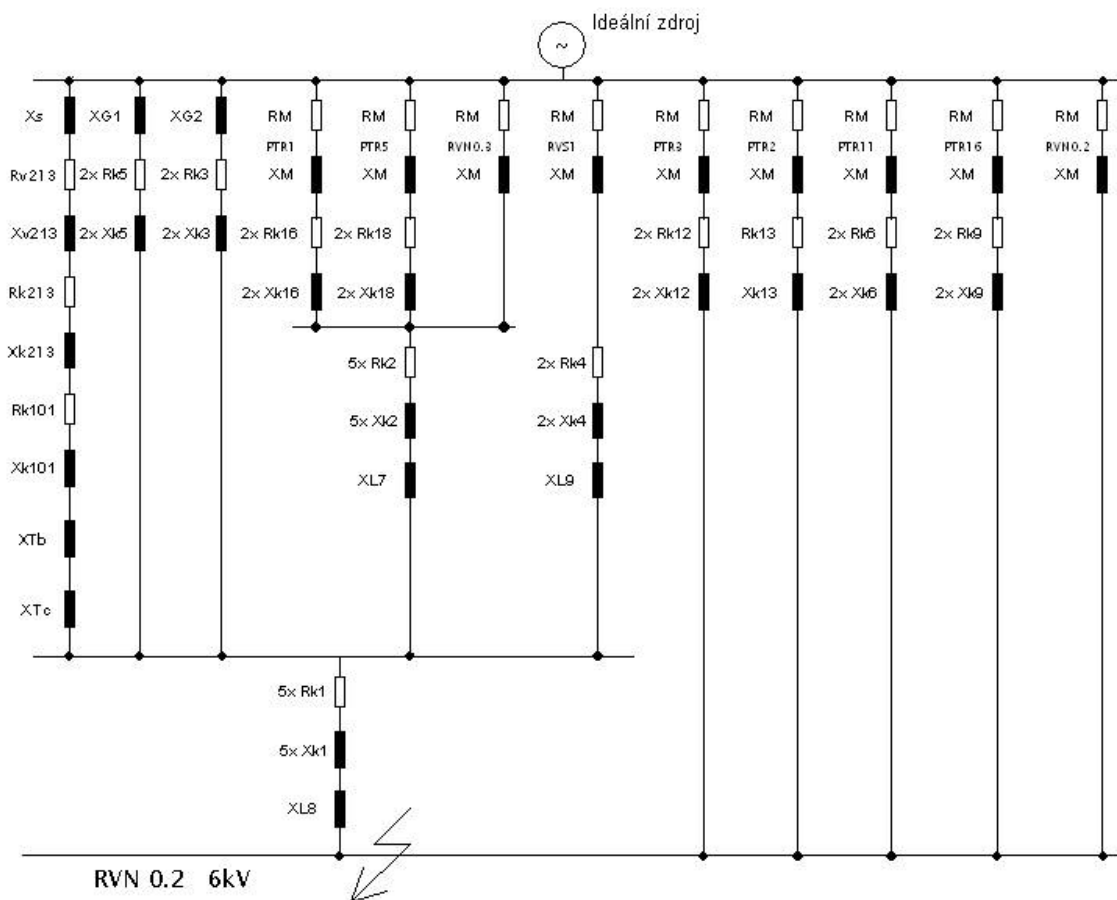
Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,1132} = \underline{\underline{33,641 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 33,641 = \underline{\underline{349,612 \text{ MVA}}}$$

5.25. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.2 – varianta 2



obr. 48 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVN 0.2

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0067^2 + 0,243^2} = \underline{\underline{0,2431 \Omega}}$$

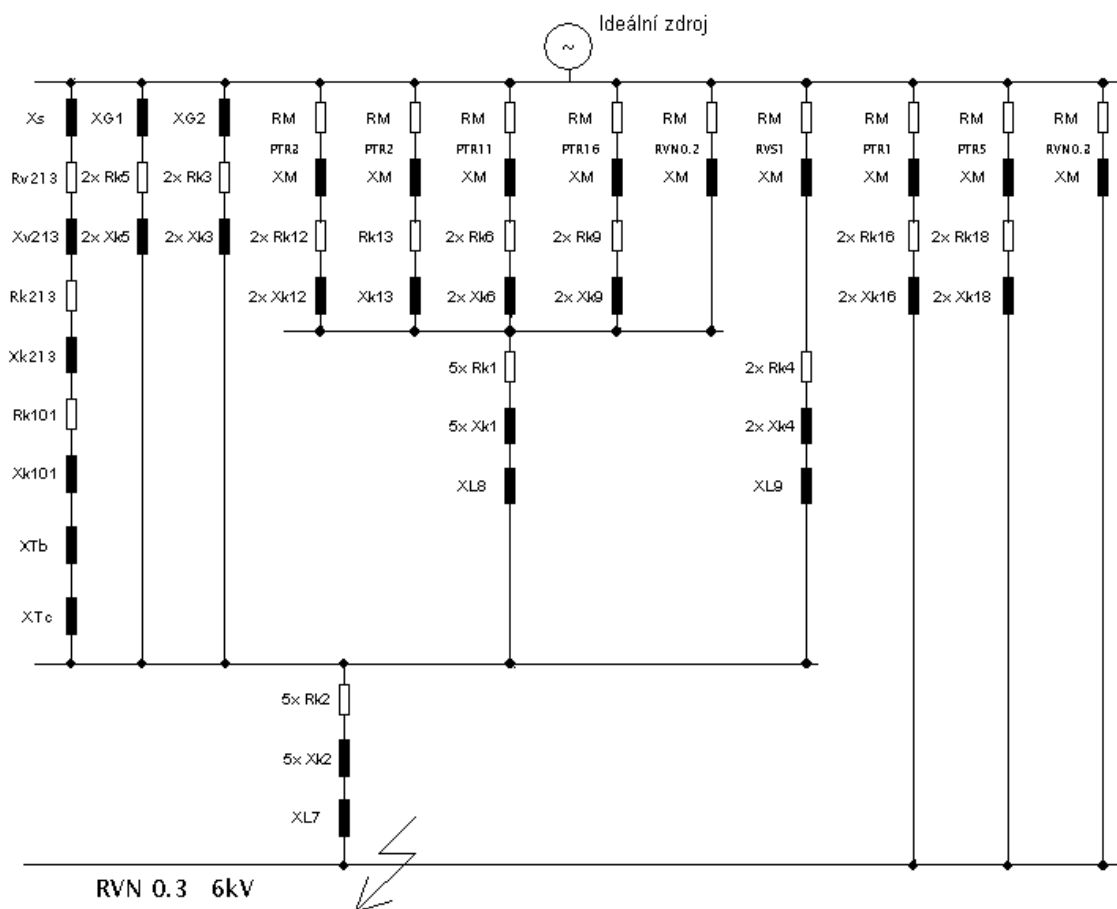
Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2431} = \underline{\underline{15,674 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 15,674 = \underline{\underline{162,891 \text{ MVA}}}$$

5.26. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVN 0.3 – varianta 2



obr. 49 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVN 0.3

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0075^2 + 0,2662^2} = 0,2663 \Omega$$

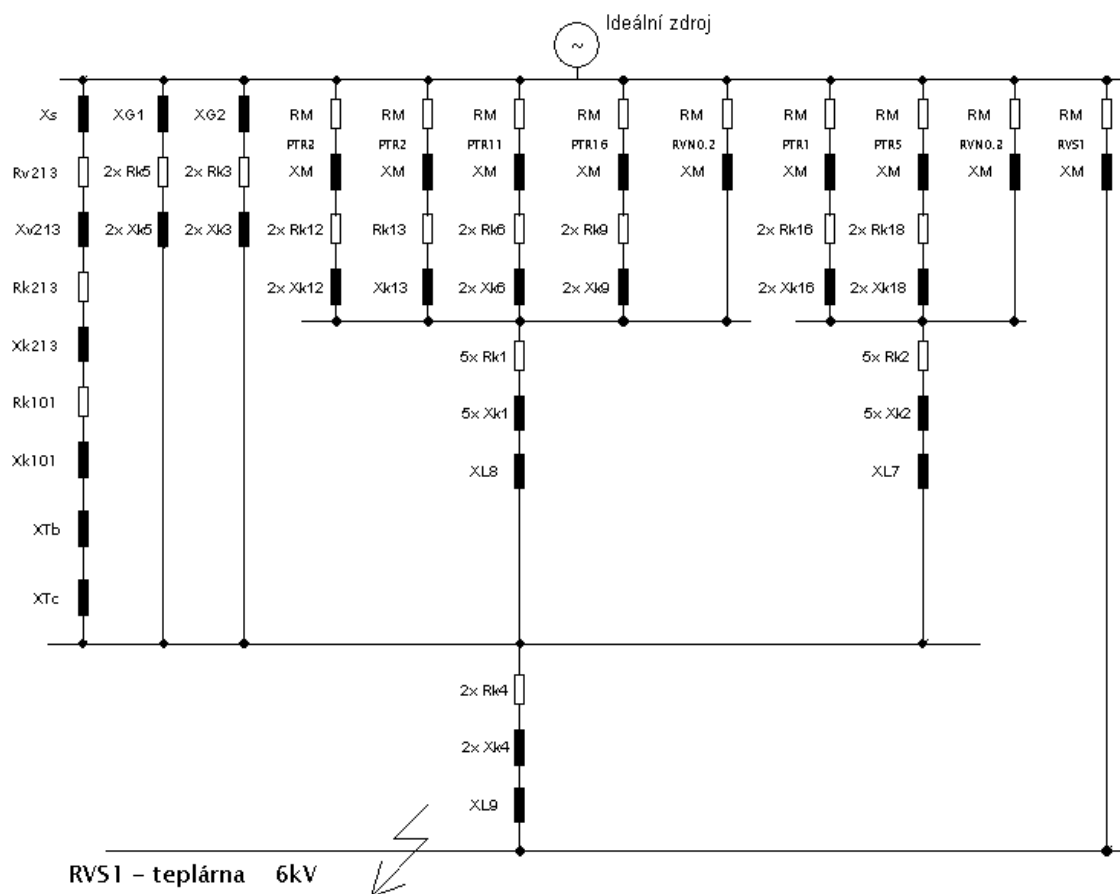
Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2663} = 14,305 \text{ kA}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 14,305 = 148,660 \text{ MVA}$$

5.27. Maximální zkratové poměry na rozvodně RVS1 – varianta 2



obr. 50 Náhradní schéma soustavy při zkratu na RVS1 - teplárna

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,0096^2 + 0,3914^2} = \underline{\underline{0,3915 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,6}{\sqrt{3} \cdot 0,3915} = \underline{\underline{9,731 kA}}$$

Maximální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 9,731 = \underline{\underline{101,131 MVA}}$$

5.28. Maximální zkratové poměry na ostatních rozvodnách vn a nn – varianta 2

U ostatních rozvodů vn a nn jsou náhradní schémata shodné, a proto jsou zde uvedeny jen výsledné hodnoty maximálních zkratových proudů a výkonů (viz. tabulka 2).

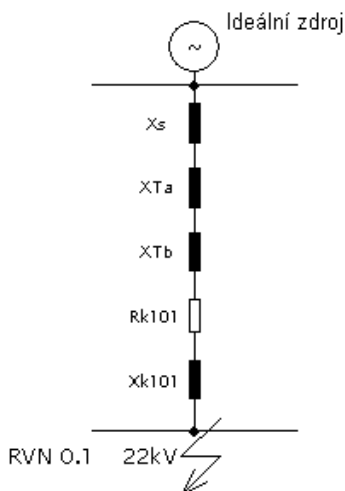
tabulka 2 Maximální zkratové poměry na ostatních rozvodnách - varianta 2

Rozvodny vn	$I''_{k3\max}$	$S''_{k3\max}$
	(kA)	(MVA)
PTR1	13,208	137,268
PTR2	10,318	107,235
PTR3	14,377	149,414
PTR5	12,102	125,796
PTR11	13,782	143,227
PTR14	13,599	141,330
PTR16	13,522	140,525
Rozvodny nn		
PTR4	20,122	13,941
PTR6	18,838	13,051
PTR7	18,786	13,015
PTR8	20,347	14,097
PTR9	19,642	13,608
PTR10	19,046	13,193
PTR18	19,380	13,427
PTR17-HR	20,397	14,131
PTR17-R-T3	20,249	14,029

6. Výpočet minimálních zkratových poměrů na rozvodnách vn a nn

Při výpočtu minimálních zkratových poměrů podle kapitoly 3.7.2. se zanedbává příspěvek motorů i generátorů. Proto je výpočet značně jednodušší než při výpočtu maximálních zkratových poměrů.

Příklad výpočtu minimálních zkratových poměrů na rozvodně RVN 0.1 – varianta 1:



obr. 51 Náhradní schéma soustavy při zkratu na rozvodně RVN 0.1

Reaktance nadřazené soustavy 110kV: (přepočtená na napětíovou hladinu v místě zkratu)
Minimální zkratový výkon na rozvodně R110 kV byl dán 590,1 MVA.

$$X_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k3 \min}''} = \frac{1,0 \cdot 110^2}{590,1} \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 0,8202 \Omega$$

Reaktance trojvinutového transformátoru T101:

$$X'_{AB} = \frac{u_{rAB}}{100} \cdot \frac{U_{rTC}^2}{S_{rTAB}} = \frac{9,4}{100} \cdot \frac{22^2}{25} = 1,8198 \Omega$$

$$X'_{BC} = \frac{u_{rBC}}{100} \cdot \frac{U_{rTC}^2}{S_{rTBC}} = \frac{5,67}{100} \cdot \frac{22^2}{25} = 1,0977 \Omega$$

$$X'_{CA} = \frac{u_{rCA}}{100} \cdot \frac{U_{rTC}^2}{S_{rTCA}} = \frac{16,47}{100} \cdot \frac{22^2}{25} = 3,1885 \Omega$$

Výpočet korekčních součinitelů:

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,094} = 0,9892$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0567} = 1,0106$$

$$K_{TCA} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TCA}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,1647} = 0,951$$

Potom:

$$X_{AB} = X'_{AB} \cdot K_{TAB} = 1,8002 \Omega$$

$$X_{BC} = X'_{BC} \cdot K_{TBC} = 1,1093 \Omega$$

$$X_{CA} = X'_{CA} \cdot K_{TCA} = 3,0324 \Omega$$

Z toho pak:

$$X_{Ta} = \frac{1}{2} \cdot (X_{AB} + X_{AC} - X_{BC}) = \frac{1}{2} \cdot (1,8002 + 3,0324 - 1,1093) = 1,8616 \Omega$$

$$X_{Tb} = \frac{1}{2} \cdot (X_{AB} + X_{BC} - X_{AC}) = \frac{1}{2} \cdot (1,8002 + 1,1093 - 3,0324) = 0,0614 \Omega$$

$$X_{Tc} = \frac{1}{2} \cdot (X_{AC} + X_{BC} - X_{AB}) = \frac{1}{2} \cdot (3,0324 + 1,1093 - 1,8002) = 1,1707 \Omega$$

Rezistance a reaktance kabelu K101:

$$R_{K101} = R_{k101} \cdot l_{101} = 0,0605 \cdot 0,105 = 0,00635 \Omega$$

$$X_{K101} = X_{k101} \cdot l_{101} = 0,1005 \cdot 0,105 = 0,01055 \Omega$$

Celková impedance:

$$\begin{aligned} Z_k &= X_S + X_{Ta} + X_{Tb} + R_{K101} + X_{K101} = j0,8202 + j1,8616 + j0,0614 + 0,00635 + j0,01055 = \\ &= 0,00635 + j2,7538 \Omega \end{aligned}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,00365^2 + 2,7538^2} = \underline{\underline{2,7538 \Omega}}$$

Minimální počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3\min} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,0 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 2,7538} = \underline{\underline{4,612 \text{ kA}}}$$

Minimální zkratový výkon zkratového obvodu při trojfázovém zkratu:

$$S''_{k3\min} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\min} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 4,612 = \underline{\underline{175,756 \text{ MVA}}}$$

Výsledky na ostatních rozvodnách vn a nn u obou variant jsou uvedeny v tabulce (viz. tabulka 3). Výpočty jsou obdobné jako u rozvodny RVN 0.1. U varianty 2 byl dán minimální zkratový výkon 218 MVA na rozvodně R22 kV.

tabulka 3 Minimální zkratové poměry na rozvodnách vn a nn

	VARIANTA 1		VARIANTA 2	
	$I''_{k3\min}$	$S''_{k3\min}$	$I''_{k3\min}$	$S''_{k3\min}$
Rozvodny vn	(kA)	(MVA)	(kA)	(MVA)
RVN 0.0	12,088	125,629	9,842	102,283
RVN 0.1	4,612	175,756	3,621	137,987
RVN 0.2	7,094	73,729	6,256	65,020
RVN 0.3	7,096	73,748	6,257	65,034
RVS1 - teplárna	5,904	61,365	5,312	55,209
PTR1	6,702	69,652	5,951	61,845
PTR2	5,710	59,342	5,167	53,701
PTR3	6,763	70,290	5,998	62,343
PTR5	6,444	66,970	5,749	59,747
PTR11	6,588	68,464	5,861	60,917
PTR14	6,905	71,758	6,108	63,486
PTR16	6,498	67,530	5,791	60,186
Rozvodny nn				
PTR4	14,629	10,135	14,361	9,950
PTR6	13,907	9,635	13,645	9,453
PTR7	14,679	10,169	14,410	9,983
PTR8	14,769	10,232	14,498	10,044
PTR9	14,350	9,942	14,088	9,760
PTR10	14,851	10,289	14,579	10,101
PTR18	14,189	9,830	13,924	9,647
PTR17-HR	14,789	10,246	14,517	10,058
PTR17-R-T3	14,702	10,186	14,434	10,000

7. Kontrola kabelů vn na dovolené oteplení při zkratu

Ochrany sítí vn musí přerušit (odepnout) každý zkratový proud dříve než dojde k přehřátí jádra vodiče nad dovolenou mez a tím možnosti poškození vodiče (u kabelu tepelné poškození izolace, u volných vedení prověšení vodičů).

Pro výpočet kontroly kabelů na dovolené oteplení při zkratu je rozhodující ekvivalentní oteplovací proud I_{th} , průřez, typ vodiče či kabelu a hladina napětí, na které se vodič či kabel nachází.

Maximální čas odepnutí $t_{k \max}$ udává maximální dovolenou dobu, do které musí být daný kabelový vývod vypnut tak, aby nedošlo k překročení jeho dovoleného oteplení. Je dán vztahem:

$$t_{k \max} \leq \left[\frac{K \cdot S}{I_{th}} \right]^2 \quad (\text{s}; -; \text{mm}^2; \text{A}) \quad (7.1)$$

kde K je koeficient pro výpočet oteplení při zkratu (viz. tabulka 4),
 S průřez vodiče,
 I_{th} ekvivalentní oteplovací proud.

tabulka 4 Koeficient K pro určení minimálního průřezu vodičů podle oteplení při zkratu

Druh izolace	Napětí (kV)	Značka (-)	K		
			Cu (-)	Al (-)	Fe (-)
Napuštěný papír	do 6 kV	N	127	84	-
	do 10 kV		130	86	-
	22 kV		108	71	-
Polyvinylchlorid	do 10 kV	Y	113	75	-
Síťový polyetylén	do 30 kV	X	141	93	-
Holé vodiče mechanicky nezatížené			152	107	-
Holé vodiče mechanicky zatížené			119	84	-
Ocel mechanicky nezatížená			-	-	59
Ocel mechanicky zatížená			-	-	53

Podle (3.41) se ekvivalentní oteplovací proud vypočte podle vztahu:

$$I_{th} = I_{k3 \max}'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (\text{A})$$

Předpokládá se, že doba vypnutí zkratů zkratovými ochranami kontrolovaných kabelů bude do 0,5 sekundy. Tato doba zahrnuje dobu působení elektrické ochrany a také dobu vypnutí vypínače. Z obr. 10 se určí pro dobu 0,5 s hodnota součinitele $m = 0,04$. Jelikož se při výpočtu u daného průmyslového podniku jedná o elektricky vzdálené zkraty, je hodnota součinitele podle obr. 11 $n = 1$.

Příklad výpočtu kontroly kabelu č. 1 na rozvodně RVN 0.0 na dovolené oteplení při zkratu:

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{th} = I''_{k3 \max} \cdot \sqrt{m+n} = 36\,530 \cdot \sqrt{0,04+1} = 36\,530 \cdot \sqrt{1,04} = 36\,530 \cdot 1,02 = \underline{\underline{37\,260,6 \text{ A}}}$$

Maximální čas odepnutí zkratového proudu:

$$t_{k \max} = \left[\frac{K \cdot S}{I_{th}} \right]^2 = \left[\frac{75 \cdot 1200}{37260,6} \right]^2 = \underline{\underline{5,83 \text{ s}}}$$

Dále zde jsou přehledně uvedeny v tabulkách hodnoty a výsledky všech kabelů na kontrolu dovoleného oteplení při zkratu:

Rozvodna RVN 0.1

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
101	T101 - 22 kV	22-AXEKVCE 3x500+35	1	500	10677,4	93	18,97

Rozvodna RVN 0.0

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
1	RVN 0.2	6- AYKY 3x240	5	1200	37260,6	75	5,83
2	RVN 0.3	6- AYKY 3x240	5	1200	37260,6	75	5,83
3	TG2	6- AYKY 3x240	2	480	37260,6	75	0,93
4	RVS1	6- AYKY 3x240	2	480	37260,6	75	0,93
5	TG1	6- AYKY 3x240	2	480	37260,6	75	0,93

Rozvodna RVN 0.2

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
6	PTR11	6- AYKCY 3x240	2	480	16390,4	75	4,82
7	PTR8-T8.2	6- AYKCY 3x240	1	240	16390,4	75	1,21
8	CVA "B"	6- AYKCY 3x240+25	1	240	16390,4	75	1,21
9	PTR16	6- AYKCY 3x240	2	480	16390,4	75	4,82
10	CVA "C"	6- AYKCY 3x240+25	1	240	16390,4	75	1,21
11	PTR6	6- AYKCY 3x150	1	150	16390,4	75	0,47
12	PTR3	6- AYKCY 3x240	2	480	16390,4	75	4,82
13	PTR2	6- AYKCY 3x240	1	240	16390,4	75	1,21

Rozvodna RVN 0.3

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
14	CVA "A"	6- AYKCY 3x240+25	1	240	14976,7	75	1,44
15	PTR10	6- AYKCY 3x240	1	240	14976,7	75	1,44
16	PTR1	6- AYKCY 3x240	2	480	14976,7	75	5,78
17	PTR14	6- AYKCY 3x240	2	480	14976,7	75	5,78
18	PTR5	6- AYKCY 3x240	2	480	14976,7	75	5,78
19	PTR7	6- AYKCY 3x240	1	240	14976,7	75	1,44

Rozvodna RVS1 – teplárna

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
20	EN1	6- AYKY 3x150	1	150	10135,7	75	1,23
21	EN2	6- AYKY 3x150	1	150	10135,7	75	1,23

Rozvodna PTR1

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
22	GK 101A	6- AYKCY 3x150	1	150	13789,4	75	0,67
23	GK 101B	6- AYKCY 3x150	1	150	13789,4	75	0,67
24	GK 102A	6- AYKCY 3x150	1	150	13789,4	75	0,67
25	GK 102B	6- AYKCY 3x150	1	150	13789,4	75	0,67

Rozvodna PTR2

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
26	HZS-motor	6- AYKCY 3x150	1	150	10682,5	75	1,11

Rozvodna PTR3

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
27	ftal-turbo	6- AYKCY 3x150	1	150	14997,1	75	0,56
28	PTR17-T1	6- AYKCY 3x150	2	300	14997,1	75	2,25
29	PTR9-T9.1	6- AYKCY 3x240	1	240	14997,1	75	1,44
30	PTR4-T40	6- AYKCY 3x240	1	240	14997,1	75	1,44
31	PTR17-T3	6- AYKCY 3x150	1	150	14997,1	75	0,56

Rozvodna PTR5

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
32	EN1-výtop	6- AYKCY 3x150	1	150	12610,3	75	0,80
33	EN2-výtop	6- AYKCY 3x150	1	150	12610,3	75	0,80
34	M031-K7	6- AYKCY 3x150	1	150	12610,3	75	0,80

Rozvodna PTR11

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
35	M006-komp 3	6- AYKCY 3x150	1	150	14356,5	75	0,61
36	M008-komp 1	6- AYKCY 3x150	1	150	14356,5	75	0,61
37	M009-komp 4	6- AYKCY 3x150	1	150	14356,5	75	0,61
38	M014-komp 2	6- AYKCY 3x150	1	150	14356,5	75	0,61

Rozvodna PTR16

Kabel č.		typ	počet	průřez	I_{th}	K	$t_{k \max}$
(-)	do	(-)	(-)	(mm ²)	(A)	(-)	(s)
39	PTR18-T18.1	6- AYKCY 3x150/25	1	150	14075,0	75	0,64
40	MP 160.5	6- AYKCY 3x150	1	150	14075,0	75	0,64
41	MP 160.6	6- AYKCY 3x150	1	150	14075,0	75	0,64
42	MP 160.8	6- AYKCY 3x150	1	150	14075,0	75	0,64
43	MP 160.12	6- AYKCY 3x150	1	150	14075,0	75	0,64
44	MP 160.15	6- AYKCY 3x150	1	150	14075,0	75	0,64
45	MP 160.16	6- AYKCY 3x150	1	150	14075,0	75	0,64

8. Závěr

Cílem této diplomové práce byl výpočet maximálních a minimálních zkratových poměrů na všech rozvodnách vn a nn průmyslového podniku pro obě zadané varianty napájení, a také kontrola kabelů vn na dovozené oteplení při zkratu.

V úvodních kapitolách, věnovaných teorii napájení průmyslových rozvodů a rozboru výpočtu zkratových poměrů, jsem se snažil vypsát z použité literatury nejdůležitější poznatky o průmyslových rozvodech a zkratech, vedoucí k lepšímu pochopení problematiky výskytu zkratů a jejich účinků na elektrickou síť. Zároveň jsem zde z normy ČSN EN 60909-0, zabývající se zkratovými proudy v trojfázových soustavách, vybral a uvedl základní vzorce a postupy k výpočtu zkratových poměrů.

Poté jsem písemně i graficky popsal základní provozní zapojení sítě daného průmyslového podniku pro variantu napájení z rozvodny R110 kV (varianta 1), a pro variantu napájení z rozvodny R22 kV (varianta 2).

V praktické části jsem vypočetl maximální a minimální zkratové poměry na všech dvanácti rozvodnách vn a devíti rozvodnách nn, a to pro obě zadané varianty napájení. Pro každou rozvodnu jsem postupně sestavil náhradní schéma, pomocí kterého jsem vypočetl celkovou hodnotu impedance zkratového obvodu. Z té jsem následně vypočetl počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu a zkratový výkon. V následujících tabulkách jsou přehledně uvedeny vypočtené hodnoty maximálních rázových zkratových proudů a maximálních zkratových výkonů na všech rozvodnách vn (viz. tabulka 5) a rozvodnách nn (viz tabulka 6) u obou variant.

Maximální zkratový proud a výkon je důležité určit z toho důvodu, aby se na tuto hodnotu mohlo dimenzovat zařízení ve zkratovém obvodu. To musí být ochranami bezpečně vypnuto dříve, než dojde k jejich poškození. Zároveň musí zkratové ochrany tyto proudy a výkony vydržet. Naproti tomu minimální zkratové poměry zjišťujeme z důvodu správného nastavení ochran. Ochrana musí na tyto hodnoty včas reagovat.

tabulka 5 Maximální zkratové poměry na rozvodnách vn

	VARIANTA 1		VARIANTA 2	
	$I''_{k3\max}$	$S''_{k3\max}$	$I''_{k3\max}$	$S''_{k3\max}$
Rozvodny vn	(kA)	(MVA)	(kA)	(MVA)
RVN 0.0	36,530	379,660	33,641	349,612
RVN 0.1	10,468	398,916	9,373	357,183
RVN 0.2	16,069	167,001	15,674	162,891
RVN 0.3	14,683	152,598	14,304	148,660
RVS1 - teplárna	9,937	103,270	9,731	101,131
PTR1	13,519	140,502	13,208	137,268
PTR2	10,473	108,841	10,318	107,235
PTR3	14,703	152,802	14,377	149,414
PTR5	12,363	128,482	12,102	125,796
PTR11	14,075	146,274	13,782	143,227
PTR14	13,940	144,876	13,599	141,330
PTR16	13,799	143,413	13,522	140,525

tabulka 6 Maximální zkratové poměry na rozvodnách nn

	VARIANTA 1		VARIANTA 2	
	$I''_{k3\max}$	$S''_{k3\max}$	$I''_{k3\max}$	$S''_{k3\max}$
Rozvodny nn	(kA)	(MVA)	(kA)	(MVA)
PTR4	20,694	14,337	20,122	13,941
PTR6	19,332	13,394	18,838	13,051
PTR7	19,361	13,413	18,786	13,015
PTR8	20,932	14,502	20,347	14,097
PTR9	20,185	13,985	19,642	13,608
PTR10	19,634	13,602	19,046	13,193
PTR18	19,906	13,791	19,380	13,427
PTR17-HR	20,985	14,538	20,397	14,131
PTR17-R-T3	20,828	14,430	20,249	14,029

Z tabulek je zřejmé, že hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a výkonu jsou na všech rozvodnách vyšší u varianty 1, to znamená při napájení průmyslového podniku z rozvodny R110 kV.

Následně jsem zkontroloval kabely na dovolené oteplení při zkratu. Zkratová ochrana vypíná do 0,1 sekundy, ale do celkového času odepnutí zkratu se musí započítat také čas vypnutí vypínače. Byl dán předpoklad, že doba vypnutí zkratů kontrolovaných kabelů bude do 0,5 sekundy. Pro výpočet maximálního času odepnutí zkratu $t_{k\max}$ byl rozhodující ekvivalentní oteplovací proud, průřez a typ kabelu a hladina napětí, na které se kabel nachází.

Ekvivalentní oteplovací proud jsem vypočetl pomocí maximálního počátečního rázového zkratového proudu při trojfázovém zkratu na rozvodně, ze které byl kabel napájen, a pomocí součinitelů m a n , odečtených z grafů. Při výpočtu jsem použil maximální zkratový proud rozveden z varianty 1, jelikož má vyšší hodnotu než proud varianty 2.

Průřezy kabelů vn vyhovují nastavení zkratových ochran. Jen u kabelu číslo 11, napájeném z rozvodny RVN 0.2, vypočtený maximální čas odepnutí zkratu nevyhovuje a je nutno učinit opatření, která povedou ke zvýšení odolnosti proti účinkům zkratů. Takovým opatřením může být například zvýšení průřezu kabelu.

Literatura

- [1] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha, 1987.
- [2] Hradílek, Z.: Elektroenergetika II. 1. vydání, Skripta VŠB – TUO, Ostrava, 1993.
- [3] ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
- [4] URL <http://homen.vsb.cz/~mah30/>
- [5] Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. 1. vydání, Skripta VŠB – TUO, Ostrava 2008.
- [6] Pauza, J., Krychtálek, Z.: Elektrické stanice. SNTL, Praha, 1989.
- [7] Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení. 2. vydání, Skripta VŠB – TUO, Ostrava, 2002.
- [8] Medvec, Z.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách. 1. vydání, Skripta VŠB – TUO, Ostrava, 2001.

Seznam příloh

- A) DATABÁZE KABELŮ VN
- B) DATABÁZE MOTORŮ
- C) DATABÁZE GENERÁTORŮ
- D) DATABÁZE REAKTORŮ
- E) DATABÁZE TRANSFORMÁTORŮ
- F) DATABÁZE NAPÁJECÍCH ROZVODEN